Pour l'industrie
et le commerce

92-06187/

Comité de rédaction

B. Zgola, Brasserie Labatt du Canada

François Litalien, Cley & Tinker

J.F. Nicks, Matériaux de Construction Domtar Ltée

J.C. Munro, Allied Chemical Canada

B.J. Davies, Canron

Dan McFadyen, John Deere Welland Works

W.A. Jones, Canada Wire & Cable Ltée

F.R. Bridgewater, 3M du Canada

R.C. Walterson, Thames Valley Beverages Ltd.

W.J. Walcott, General Motors du Canada

A.C.S. Hayden, Laboratoire Canadien de recherche sur la combustion

Table des matières

Introduction 1

Fours et fourneaux 1

Chaudières 19

Études de cas 31

Trucs utiles pour... 36

Table de conversion métrique 39

E1-77-12
©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1980
N° de cat. M91-2/5-1980F
ISBN 0-662-90877-5

Publié en vertu de l'autorisation du
Ministre de l'Énergie, des Mines, et des Ressources

ÉCONOMIES GRÂCE À UNE COMBUSTION CONTRÔLÉE 5

Économies grâce à une combustion contrôlée

Introduction

Presque toutes les industries ont des chaudières à vapeur, des fours, des fourneaux et divers autres équipements à combustion. Le présent document a pour but d'aider les entreprises canadiennes à tirer le maximum de leur consommation de combustible et, par conséquent, à réaliser des économies substantielles d'énergie et d'argent.

Certaines usines possèdent également le potentiel nécessaire pour transformer leurs déchets en source de chaleur. Afin de favoriser, l'implantation de systèmes d'utilisation des déchets, une partie du texte traite de l'utilisation des incinérateurs à pyrolyse.

Fours et fourneaux

L'industrie utilise environ onze pour cent de l'énergie nationale pour le chauffage direct (n'inclut pas le chauffage indirect à la vapeur). Les grandes usines de l'industrie lourde sont les plus gros consommateurs pour le traitement des métaux primaires, le raffinage du pétrole ou la fabrication du ciment. Mais les petites entreprises en utilisent aussi une proportion considérable pour le traitement thermique du métal, la cuisson de la céramique, le séchage de la peinture, la cuisson du pain et bien d'autres opérations de chauffage. La présente section donne des moyens d'économiser l'énergie avec les fourneaux et les fours.

Les études énergétiques démontrent que dans les petites entreprises à forte consommation d'énergie, une grande partie de l'énergie est consacrée au chauffage direct, dans les fourneaux, les fours, les séchoirs et autres. Le succès d'un programme d'utilisation rationnelle de l'énergie dépend donc de l'adoption des mesures les plus susceptibles de diminuer la consommation d'énergie de ces équipements.

Le choix de ces mesures ne peut être fait de façon empirique. On peut, bien sûr, avoir recours à des listes énumérant divers moyens d'accroître l'efficacité énergétique de l'équipement de chauffage mais il restera toujours à définir un ordre des priorités adapté aux besoins particuliers. En d'autres termes, dans une installation donnée, il peut être particulièrement impérieux de régler le rapport air-combustible tandis que dans une autre, le manque d'isolation peut être la principale lacune; ailleurs enfin, on peut n'avoir aucun besoin de programme d'économie d'énergie.

Le bilan calorifique ou énergétique est l'instrument qui permettra d'évaluer la quantité d'énergie qui peut être économisée et les meilleurs moyens d'y arriver. Il permettra de traduire les mesures et calculs en termes d'économie de combustible et d'argent.

Comment se servir du bilan calorifique

Le bilan calorifique est une simple mesure de rendement, une liste de toutes les formes d'énergie qui entrent dans un système au cours d'une période donnée (apport d'énergie) et de celles qui en sortent (production). L'énergie ne pouvant être ni créée ni détruite, l'apport et la production énergétique doivent être égales.

Dans un programme d'utilisation rationnelle de l'énergie, le bilan calorifique d'un fourneau critique sert à diverses fins.

- il indique quelle proportion de l'apport d'énergie a vraiment servi aux fins prévues, par exemple: chauffer le produit, éliminer l'eau et ainsi de suite. Ces données fournissent le rendement énergétique du système; en pratique, il est souvent aussi bas que deux à cinq pour cent.
- Il indique la quantité d'énergie perdue dans l'atmosphère ou peut-être, dans un bac de refroidissement. Il s'agit bien sûr d'une économie d'énergie théoriquement possible.
- Le bilan calorifique, s'il est relativement bien fait, indique aussi comment se produit la déperdition de chaleur. Une partie de la chaleur est retenue par le produit, une autre partie s'échappe par les cheminées et une autre, enfin, est perdue par le rayonnement des parois du fourneau. Ces renseignements sont autant d'indices concernant les meilleures mesures à prendre pour économiser l'énergie.
- Mais ce qui importe plus encore, un bilan calorifique est de loin le meilleur outil pour évaluer les économies d'énergie et d'argent que peuvent permettre des changements dans les procédés et l'équipement qui sont proposés dans un but de conservation de l'énergie. Il permet de plus de choisir les plus intéressantes des différentes mesures soumises.

Pour illustrer ces énoncés, considérons un système simple servant à amener une chopine d'eau de 24° C au point d'ébullition, dans un chaudron de fonte placé sur la grande plaque d'une cuisinière. Des tests ont démontré qu'il fallait 2 pieds cubes de gaz ou 2000 Btu pour y parvenir. Ces 2000 Btu représentent l'apport d'énergie dans le système. La

production ou "sortie" du système se divise en trois parties. L'énergie nécessaire pour amener l'eau de 24° C à 100° C peut être évaluée à 140 Btu alors que l'énergie nécessaire pour réchauffer le chaudron de 3.5 livres est d'environ 60 Btu. La troisième partie, soit environ 1800 Btu, doit donc être l'énergie qui rayonne des produits de combustion chauds et se perd dans l'atmosphère de la cuisine. Le rendement du système correspond donc à 140 Btu divisé par 2000 Btu ou 7 p. 100.

Un système plus efficace utiliserait une fiole de laboratoire comme contenant et un petit thermoplongeur comme source d'énergie. La chaleur nécessaire pour réchauffer le contenant serait réduite à 10 Btu et la perte dans l'air environnant, à environ 50 Btu. Il suffirait alors d'un apport d'énergie électrique de 200 Btu. En supposant qu'environ 600 Btu de combustible fossile sont nécessaires pour produire cette énergie électrique, le rendement passe à 140 Btu divisé par 600 Btu ou 23 p. 100.

Le point important de cette démonstration est que le bilan calorifique a permis de déceler la plus importante des pertes d'énergie — la forte déperdition au niveau du chaudron. Cela ne signifie cependant pas que le chauffage par résistance est plus efficace que le chauffage au combustible fossile.

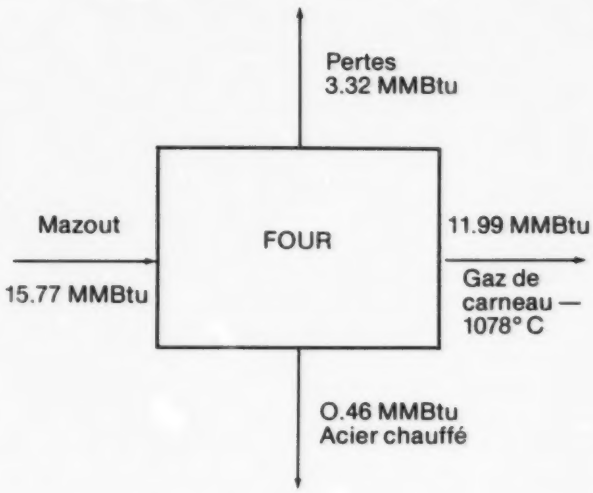
Amélioration d'un four—un exemple

Comme exemple industriel, prenons un four à mazout qui chauffe des fournées d'une tonne d'acier à 1040° C pour des opérations de forge. Le four brûle 95 gallons de mazout numéro 2 par cycle de 2 heures: la température dans la cheminée est de 1078° C et une analyse des gaz de carneau indique une teneur en oxygène de 11 p. 100, équivalant à un excès d'air de 100 p. 100. Le seul apport énergétique dans le système est la combustion du mazout. Étant donné un contenu énergétique de 166 000 Btu par gallon pour du mazout numéro 2, on peut faire le calcul suivant: apport = 166 000 Btu/gallon x 95 gallons = 15,77 MMBtu.

Cette même quantité d'énergie doit aussi sortir du four pendant chaque cycle; cela se fait sous trois formes:

1. La capacité calorifique de l'acier est: le poids de l'acier multiplié par l'augmentation de sa température multiplié par sa chaleur spécifique de 0.12 Btu/lb° F = 0.46 MMBtu.
2. La perte dans la cheminée représente l'énergie qui s'échappe dans les gaz de carneau. En se reportant au tableau ci-dessus, on note qu'étant donné une température de cheminée de 1078° C et un excès d'air de 100 p. 100. la perte à la cheminée correspond à 76 p. 100 du mazout consommé. Perte à la cheminée: 15,77 MMBtu X 0,76 = 11,99 MMBtu

FIGURE 1
Premier bilan calorifique - Four dormant



3. Les pertes par conduction et par rayonnement des parois et du toit du four constituent le reste de la sortie énergétique.
   Perte par les parois: 15,77 - (11,99 + 0,46) = 3,32 millions Btu.

Sortie: 0,46 + 11,99 + 3,32 = 15,77 MMBtu par cycle.

Ce bilan calorifique démontre clairement que la plus grande partie de l'énergie (76%) se perd par la cheminée. Si l'on consulte à nouveau le tableau, on constate que la perte par la cheminée est moindre lorsque l'air comburant est en quantité tout juste suffisante pour assurer la combustion complète du mazout. Lorsque son dosage est excessif, l'énergie du combustible sert surtout à chauffer l'air et la perte par la cheminée devient très importante. Inversement, si son dosage est insuffisant, la combustion est incomplète, ce qui entraîne aussi un gaspillage d'énergie. Le dosage correct d'air comburant est d'environ 20 p. 100 dans le cas du mazout et de 5 à 10 p. 100 dans le cas du gaz.

L'excès d'air peut être éliminé en réglant les brûleurs, en fermant l'arrivée d'air et en réparant les fentes, les trous et les portes mal ajustées. Le registre de la cheminée doit également être placé de manière à maintenir une pression légèrement positive dans la chambre de combustion afin de prévenir l'infiltration intempestive. L'objectif de 20 p. 100 d'air comburant est atteint lorsque l'analyse du gaz de carneau indique une teneur de 3 à 3.5 p. 100 d'oxygène et de 11.5 à 12 p. 100 d'anhydride carbonique.

Avec une proportion de 20 p. 100 d'air comburant, le tableau indique que la perte par la cheminée ne représente que 46 p. 100 de l'énergie du mazout au lieu des 76 p. 100 initiaux. L'énergie absorbée par l'acier demeure 0,46 MMBtu par cycle et les pertes par les parois et le toit au four sont toujours

de 3,32 MMBtu. Ce total, 3,32 + 0,46 = 3,78 MMBtu, représente maintenant 54% de l'apport énergétique total (100% - 46% = 54%). L'énergie totale en mazout nécessaire par cycle est donc de 3,78 MMBtu/0,54 = 7 MMBtu

Second bilan calorifique

Apport	*Sortie ou production*
7 MMBtu	Acier — 0,46
= 42,3 gallons (américain)	Cheminée — 3,22
de mazout	Parois — 3,32
	Total — 7 MMBtu

Dans le bilan calorifique précédent, même après avoir réglé l'excès d'air à son plus bas niveau pratique, l'énergie se perd par la cheminée à raison de 3,22 MMBtu par cycle, ou de 1365 MMBtu par année de 500 cycles. À 0,50¢ le gallon de mazout (américain) cela représente une perte de $4 850 par année.

Une partie de cette chaleur peut être récupérée en faisant passer les gaz de carneau dans un échangeur de chaleur ou dans une chaudière de récupération. La chaleur ainsi récupérée peut servir à un grand nombre d'usages dont voici les plus fréquemment mentionnés:

- Produire de la vapeur afin de traiter les matériaux, de produire du courant électrique ou pour le chauffage.
- Chauffer l'eau pour le traitement de matériaux ou pour le chauffage.
- Réchauffer l'air comburant des fours.
- Réchauffer le produit qui entre dans un four.
- Chauffer l'air pour le chauffage.

La meilleure utilisation de la chaleur récupérée dépend des procédés et des conditions de chaque usine. Dans le cas qui nous occupe, avec un four dormant, et possiblement un programme assez irrégulier, le réchauffement de l'air comburant peut être l'usage le plus profitable. Un troisième bilan calorifique représente un diagramme illustrant le passage de la chaleur dans un tel système. Les nombres représentent l'énergie en millions de Btu par cycle de deux heures.

Afin d'évaluer la consommation de mazout dans ces conditions, considérons le diagramme comme étant un système unique comportant une seule arrivée de chaleur (l'air à 38° C n'est pas considéré comme porteur de chaleur) et trois sorties. Deux de

FIGURE 2

Perte par la cheminée en fonction de l'excès d'air à diverses températures de cheminée

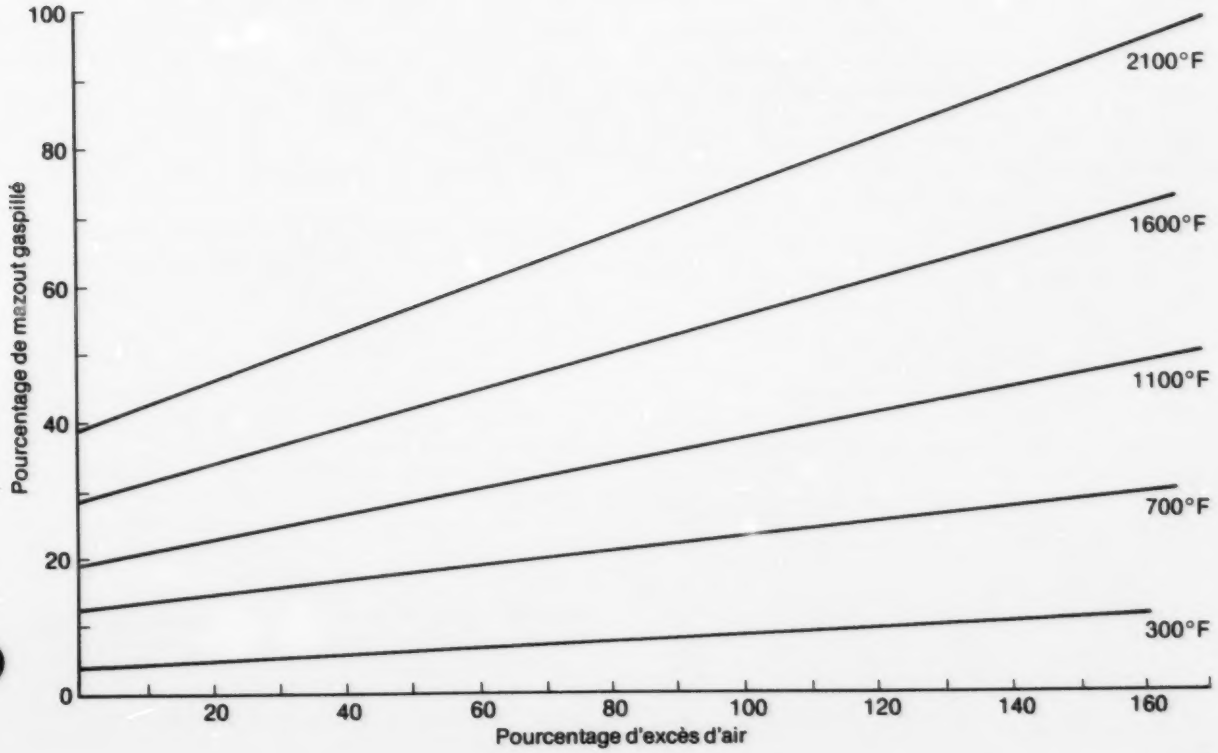
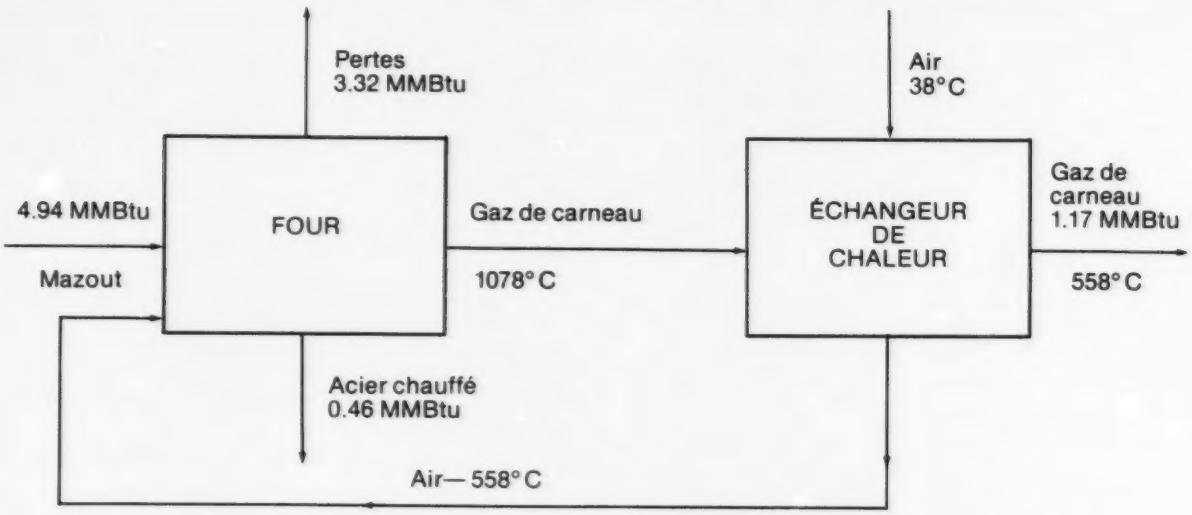


FIGURE 3

Troisième bilan calorifique—Four dormant avec air comburant préchauffé



ces sorties sont la chaleur de l'acier et les pertes par conduction. Ces sorties totalisent 3,78 MMBtu, comme au bilan calorifique numéro 2. La troisième sortie est le gaz de carneau à 558° C (la masse des gaz de carneau étant approximativement égale à la masse d'air comburant perdu, on peut raisonnablement avancer que si l'air est chauffé à 520° C, les gaz de carneau seront refroidis d'autant).

Selon le diagramme, avec un excès d'air de 20 p. 100 et une température en cheminée de 558° C, la perte par la cheminée représente 23,5 p. 100 du combustible brûlé. Les deux autres sorties, 3,78 MMBtu perdus par conduction et dans l'acier chaud doivent par conséquent représenter: 100% - 23% = 76.5% du combustible.
Énergie du combustible: 3,78 x 1/0,765 = 4,94 MMBtu par cycle.

Perte par cheminée: 4,94 x 0,235 = 1,17 MMBtu par cycle.

À ce point, la plus grande perte d'énergie dans le système est constitué par les 3,32 MMBtu perdus par conduction et par rayonnement à travers les parois du four. Supposons que des réparations adéquates ou un meilleur calorifugeage réduisent cette partie à 1,70 MMBtu par cycle. Un nouveau bilan calorifique établi comme ci-dessus indique que l'apport de combustible en sera abaissé à 2,82 et de la perte par la cheminée, à 0,66 MMBtu par cycle.

RÉSUMÉ DES CALCULS
MMBtu PAR CYCLE DE DEUX HEURES

	Arrivée (MMBtu)	Perte par cheminée	Perte par conduction	Chaleur de l'acier	Rendement
1. Conditions initiales	15.77	11.99	3.32	0.46	2.9%
2. Réduction de l'air comburant	7.00	3.22	3.32	0.46	6.6%
3. Air préchauffé	4.94	1.17	2.72	0.46	9.3%
4. Calorifugeage	2.82	0.66	1.70	0.46	16.3%

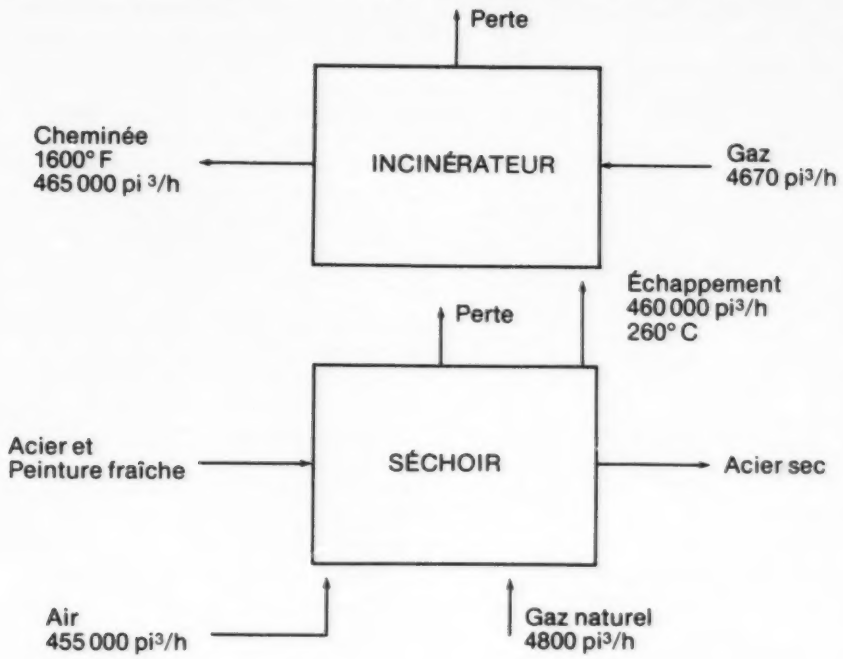
Étant donné un rythme de production de 500 cycles par année et un prix moyen du gallon de combustible de $0.50, le coût annuel de l'énergie dans les quatres hypothèses est le suivant:

1. Conditions initiales	$23,750
2. Réduction de l'excès d'air	10,540
3. Air préchauffé	7,440
4. Calorifugeage	4,250

Il est évident que les modifications ne sont pas toutes de la même importance. La plus importante est de loin la réduction de l'excès d'air de 100% à 20%. Ce seul changement permet d'économiser $13 210 par année et les sommes investies sont passablement réduites.

FIGURE 4

Séchoir à peinture conventionnel et incinérateur de vapeurs



La modification suivante, le préchauffage de l'air, n'a entraîné qu'une petite économie de $3 100. Le coût d'un échangeur de chaleur, l'installation des conduites et les modifications à apporter aux brûleurs varient grandement d'une installation à l'autre. Si, dans le cas qui nous intéresse, les coûts étaient de $2 500, il s'agirait d'une option des plus intéressante; par contre, s'ils étaient évalués à $10 000 il faudrait y penser sérieusement avant de consentir l'investissement. Cependant, si l'on suppose une augmentation soutenue des prix du combustible, même le dernier chiffre devient acceptable.

La troisième phase, le calorifugeage a permis d'économiser $3 190. Les coûts en seront assez faibles s'il ne s'agit que d'ajouter des feuilles de céramique à l'intérieur des parois mais ils seront plus élevés s'il faut refaire au complet les parois de la chaudière.

Il est évident qu'il n'existe pas de règles qui permettent de décider mécaniquement quelles seront les mesures énergétiques à prendre et leur ordre d'application. Toute décision intelligente exige une connaissance raisonnable de la situation courante et une évaluation des économies attachées à chaque proposition.

Séchoir à peinture — possibilités d'économie

Certains fours et fourneaux à marche continue, comme les fours à braser, à recuire le metal, les fours dormants lorsqu'on calcule un bilan énergétique.

Il suffit de transposer toute les unités d'énergie en Btu à l'heure ou à la minute au lieu de Btu par charge ou cycle. Les principes de gestion énergétique de ces fours sont exactement les mêmes: maintenir au minimum pratique le rapport combustible/air, calorifuger adéquatement et récupérer autant que possible la chaleur perdue.

D'autres fours, comme ceux utilisés pour sécher des produits contenant de l'eau ou un solvant organique, peuvent être plus complexes. Par exemple, le séchoir à peinture dont nous parlerons un peu plus loin a besoin de tellement d'air pour diluer les vapeurs du solvant combustible que les gaz de carneau contiennent presque 1000 p. 100 d'excès d'air. Dans un tel cas, il est pratiquement impossible d'obtenir une analyse précise de ces gaz; il est donc nécessaire de mesurer le débit d'air afin d'établir un bilan calorifique.

Prenons le cas d'un séchoir à peinture à marche continue dans lequel on enfourne 10 000 livres d'acier à l'heure recouvertes de 600 livres de peinture fraîche. La peinture est composée de 290 livres de solvant et de 310 livres de matière solide. L'air dans le four est chauffé au gaz naturel et porté à 260° C, ce qui fait évaporer le solvant (1190 pieds cubes de vapeur) et élève la température de l'acier à 204° C. Une grande quantité d'excès d'air est nécessaire afin de prévenir la formation d'une atmosphère détonnante d'air et de vapeurs de solvant; il faut habituellement 10 000 pieds cubes d'excès d'air par gallon (environ 7,25 livres) de solvant évaporé. Les règlements sur la pollution de l'air stipulent que les vapeurs d'hydrocarbures ne

peuvent être rejetées directement dans l'atmosphère. Les gaz d'échappement sont donc dirigés vers un incinérateur qui brûle davantage de gaz naturel afin d'élever la température de 260° C à 818° C. À cette température, tous les hydrocarbures sont oxydés en gaz carbonique et en eau et peuvent être renvoyés en toute sécurité dans la cheminée. Voici un diagramme d'acheminement du système.*

Bilan calorifique d'un séchoir à peinture conventionnel.

Apport

Gas naturel au four	4,80 MMBtu/h
Gas naturel à l'incinérateur	4,67
Vapeurs de solvant*	5,33
Total	14,80 MMBtu/h

Sortie

Acied chaud sec	
Perte par le cheminée	0,41 MMBtu/h
à 1600° F	12,90
Autres pertes et pertes	
non comptabilisée	1,49
Total	14,80 MMBtu/h

*Le solvant ayant une chaleur de combustion de l'ordre de 18 400 Btu/lb, il fournit une partie de l'énergie nécessaire à sa propre incinération, laquelle doit être incluse dans l'apport de chaleur.

L'étude du bilan calorifique démontre que la plus grande partie de l'apport énergétique, environ 87 p. 100, est perdue par la cheminée. Puisqu'il est impossible de réduire les pertes en fermant l'incinérateur ou en diminuant la grande quantité d'excès d'air, il faut trouver un moyen d'utiliser la chaleur gaspillée. Le diagramme illustre une technique ou un échangeur de chaleur servant à récupérer une partie de la chaleur des gaz brûlés afin de préchauffer l'échappement du four avant qu'il n'arrive dans l'incinérateur.

Les calculs suivants indiquent le bilan calorifique de ce nouveau système.

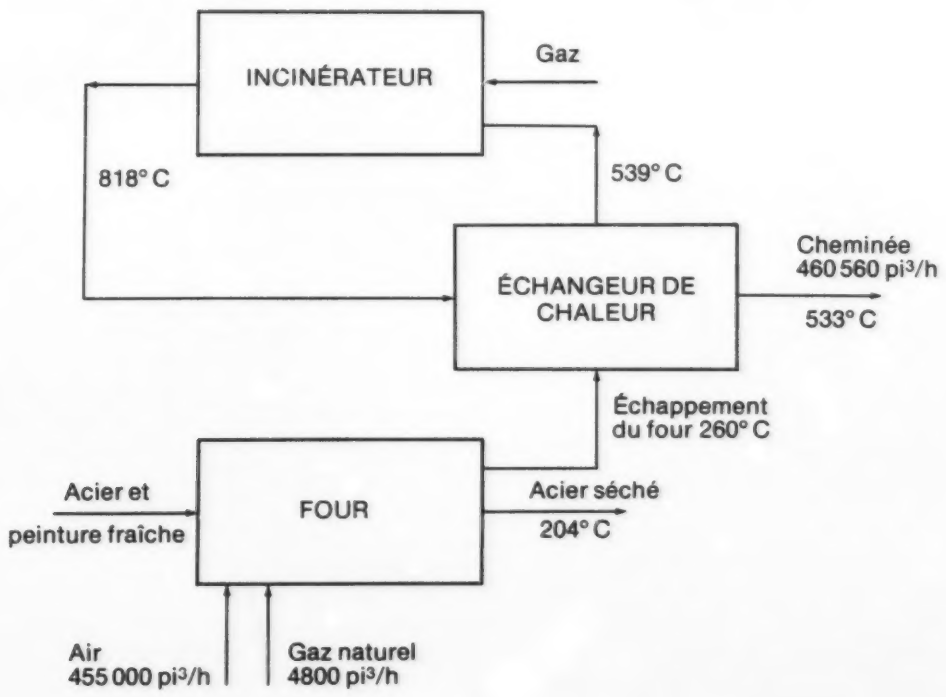
Apport

Gas naturel au four	4,80 MMBtu/h
Gas naturel à l'incinérateur*	0
Vapeurs de solvant	5,33
Total	10,13 MMBtu/h

*Une très petite quantité de combustible peut être nécessaire afin d'enflammer le jet de gaz dans l'incinérateur: c'est-à-dire, une veilleuse.

FIGURE 5

Séchoir à peinture, incinérateur de vapeur et un échangeur de chaleur



On remarque que l'addition de l'échangeur de chaleur et de la tuyauterie auxiliaire a réduit la consommation de gaz naturel de 9,47 MMBtu/h à 4,80 MMBtu/h. Si le gaz naturel coûte $2. le millier de pieds cubes et que le système fonctionne 4000 heures par année, l'économie annuelle est de:

$$\frac{(9{,}47 - 4{,}80)\ \text{MMBtu/hr} \times 4\,000\ \text{heures/année} \times \$2./\text{MCF} = \$37\,360}{1\,000\ \text{Btu/cf}}$$

Bien que l'échangeur de chaleur ait considérablement réduit les achats de combustible, il n'en reste pas moins qu'une grande partie de la chaleur se perd dans les gaz de carneau. Il est possible d'utiliser cette chaleur en installant un deuxième échangeur de chaleur et en s'en servant pour préchauffer, jusqu'à 316° C, l'air arrivant au four. Il faudra peut-être apporter des modifications au système de distribution d'air à l'intérieur du four mais il ne sera plus nécessaire d'injecter du gaz naturel sauf pendant les opérations de mise en train ou pendant le fonctionnement au ralenti. Avec un rythme de production normal, toute la chaleur provient de la combustion des vapeurs de solvant dans l'incinérateur.

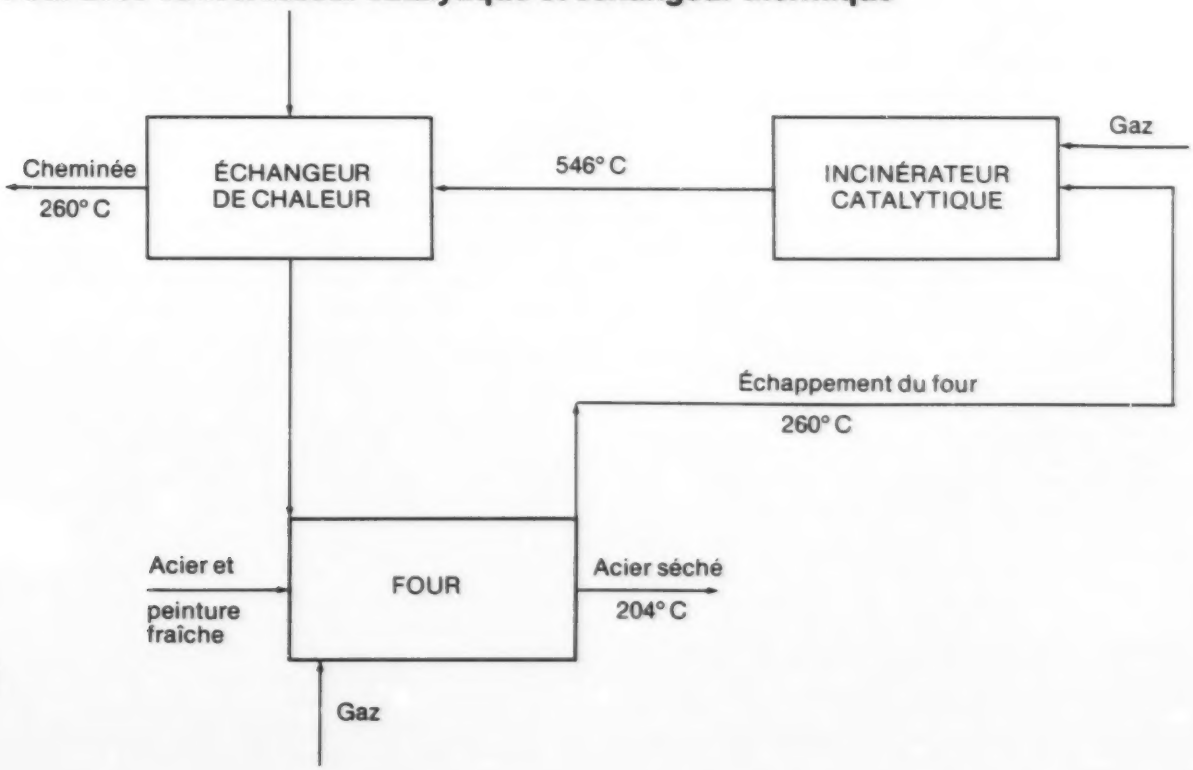
Une autre méthode d'économiser de l'énergie pendant l'incinération des vapeurs d'hydrocarbures est d'utiliser un incinérateur catalytique similaire en principe au convertisseur catalytique des systèmes d'échappement des automobiles modernes. Un incinérateur catalytique peut économiser l'énergie car la combustion des vapeurs se fait à des températures de beaucoup inférieures aux 818° C normaux. Des fabricants font même état de températures aussi basses que 204° C pour la combustion de vapeur d'hydrocarbures dans l'excès d'air. Le diagramme ci-dessous démontre l'usage possible d'un convertisseur catalytique dans un séchoir à peinture.

Le bilan calorifique de ce système indique qu'aucune chaleur provenant du gaz naturel n'est nécessaire pendant le fonctionnement à charge normale. Les brûleurs à gaz indiqués sur le diagramme ne seront nécessaires que pendant la période de mise en train ou s'il n'y a pas suffisamment de matériaux dans le séchoir pour fournir la vapeur de solvant nécessaire pour chauffer l'installation.

Apport		
Gaz naturel		0 MMBtu/h
Solvant		5.33
	Total	5.33 MMBtu/h
Sortie		
Acier séché chaud		0.41 MMBtu/h
Évaporation de solvant		0.06
Perte par cheminée à 500° F		3.61
Autres pertes		1.25
	Total	5.33 MMBtu/h

FIGURE 6

Four avec convertisseur catalytique et échangeur thermique



Certains catalyseurs sont "empoisonnés" et cessent de fonctionner correctement si les vapeurs contiennent des composés de soufre ou des métaux lourds comme le plomb. Il faut faire les vérifications nécessaires auprès du fabricant de l'équipement.

Une troisième façon d'économiser l'énergie pendant le séchage de la peinture est d'utiliser un incinérateur breveté capable de produire un échappement presque totalement libre d'oxygène (2%). Si ce gaz est utilisé dans le four pour chauffer le produit, on peut laisser s'élever la concentration de vapeurs de solvant à un niveau beaucoup plus élevé sans crainte de produire une atmosphère détonnante. On peut alors réduire de moitié le volume de gaz en circulation et économiser l'énergie de l'électricité nécessaire au fonctionnement des ventilateurs et des souffleurs.

On trouve ci-dessous un résumé des coûts du combustible pour les trois systèmes utilisés:

	Coût annuel[1] combustible	Rendement[2]
Figure 4: séchoir ordinaire	$75 700	2,8%
Figure 5: séchoir et échangeur de chaleur	$38 400	4,2%
Figure 6: convertisseur catalytique	(3)	7,7%

Si le solvant extrait par séchage de la couche de peinture a une valeur intrinsèque indépendante de sa capacité calorifique, on peut tenter de la récupérer en se servant d'une colonne à charbon activé au lieu de l'incinérer. Ce faisant, on ne réalise généralement pas une économie d'énergie mais parfois un gain financier. Certains modèles récents utilisent le vide plutôt que la chaleur pour extraire le solvant absorbé par le charbon activé et l'on affirme consommer ainsi moins d'énergie que par l'ancienne technique de chauffage. Il n'existe aucun critère qui puisse dicter mécaniquement le choix des meilleures méthodes de conservation de l'énergie concernant les séchoirs et les fours. Chaque appareil possède ses propres caractéristiques et doit faire l'objet d'un bilan calorifique individuel pour mettre en évidence sous quels aspects il se prête le mieux aux mesures d'économie d'énergie. Les fours perdent cependant presque inévitablement de grandes quantités de chaleur. Si cette chaleur peut servir au chauffage de locaux, à la production de vapeur à basse pression, d'eau chaude, et ainsi de suite, il devient possible d'améliorer le rendement assez faible mentionné dans les tableaux qui précèdent.

1) Supposons du gaz naturel à $2,00 le mille pieds cubes et un fonctionnement annuel de 4000 heures.

2) L'énergie nécessaire au produit divisée par l'énergie totale, y compris celle contenue dans le solvant de la peinture.

3) Le gaz naturel n'est utile que pendant la période de mise en route ou pendant le fonctionnement à faible régime.

Occasion d'économiser l'énergie

Il existe, de toute évidence, une grande variété de mesures permettant d'améliorer l'efficacité des fours et fourneaux. Voici une liste et une brève description des principales mesures.

Réduction de l'excès d'air

L'usage d'une quantité excessive d'air comburant peut représenter un important gaspillage d'énergie. Certes, une quantité insuffisante d'air comburant peut être tout aussi néfaste mais le cas est beaucoup moins fréquent à cause de l'intérêt croissant porté au problème de pollution de l'air, particulièrement à la formation de fumée visible.

Il n'y a pas de données précises sur la quantité d'air comburant consommée par une chaudière moyenne ou sur la quantité d'énergie perdue chaque année à cause d'un dosage incorrect du mélange air-combustible. Il faut également user de prudence lorsqu'on tente d'évaluer les économies d'énergie réalisables par réduction de l'excès d'air. Par exemple, une réduction de la proportion d'air comburant sans modification de l'allure de combustion peut entraîner une augmentation de la température de la flamme, un échauffement plus rapide des pièces traitées et un cycle plus court, plus économique.

Si en plus de réduire l'arrivée de l'air, on réduit aussi l'arrivée du combustible, la vitesse du gaz diminue, il se produit moins de turbulences dans le four et les gaz chauds restent plus longtemps à l'intérieur de la chambre de combustion. Mais les effets exacts de ces modifications sur le transfert de chaleur aux pièces traitées et aux parois de la chaudière ne sont pas toujours évidents ni faciles à évaluer. Par conséquent, avant de pouvoir déterminer avec précision les économies réalisées, il convient d'établir un nouveau bilan calorifique.

En dépit de tous ces détails complexes, la réduction de l'excès d'air est probablement la phase la plus importante dans l'économie d'énergie dans les fours. Quoi qu'il en soit, l'analyse des gaz de carneau pour déterminer l'excès d'air est essentielle au calcul des pertes par la cheminée et à l'établissement d'un nouveau bilan calorifique.

Récupération de la chaleur perdue

Un four ou un fourneau industriels dégagent inévitablement des gaz chauds qui contiennent de l'énergie récupérable. Les utilisations possibles de cette énergie récupérée sont nombreuses. Si le gaz est très chaud, disons à 780° C ou plus, il peut servir à produire de la vapeur ou de l'électricité et faire du travail mécanique. Les gaz à une température inférieure ont moins de valeur mais peuvent être utiles pour épargner de l'argent en séchant et en réchauffant les produits avant leur entrée dans le four, en réchauffant de l'eau ou en chauffant des locaux. Si les gaz ne sont qu'à

quelques degrés au-dessus de la température ambiante, ils peuvent quand même contenir de l'énergie mais, le cas échéant, il n'est souvent pas rentable de la récupérer.

Lorsque l'énergie récupérable n'est pas disponible sur une base régulière et continue, il est généralement préférable de la retourner dans le système qui l'a produite. Par exemple, on utilise la chaleur des gaz brûles d'un four à fonctionnement intermittent pour réchauffer l'air comburant de ce même four. Même dans ce cas, il y a de la chaleur perdue à une température raisonnablement élevée qui peut servir pour le chauffage de locaux ou pour des opérations de séchage, en lui adjoignant au besoin un radiateur auxiliaire qui prendra la relève lorsque le four ne fonctionnera pas.

Le fascicule intitulé "Calcul fondamental" contient des informations détaillées sur les techniques de récupération de l'énergie. Un certain nombre d'autres fascicules de la série contiennent des études de cas d'espèce (voir l'index du fascicule 1 pour la liste complète).

Calorifugeage

Un calorifugeage mal fait ou endommagé peut être la cause d'un gaspillage considérable d'énergie difficilement récupérable. En fait, dans l'un des cas mentionnés, 20% de l'énergie du combustible brûlé continuait de se perdre à cause d'un mauvais calorifugeage et cela, après l'application d'une série de mesures d'économie.

Pour avoir une évaluation de l'importance des pertes, on mesure la température de la surface externe des parois et du toit du four. Une température de 80° à 66° C est l'indice d'un calorifugeage suffisant; une température de 260° C ou plus signifie que la déperdition est probablement très importante. Le diagramme contient une estimation de la perte d'énergie au pied carré et à l'heure en fonction de la température de la surface externe des parois.

Dans le cas d'une installation importante, un balayage thermographique à infrarouges mesurera avec précision la température des grandes surfaces

FIGURE 7

Chaleur perdue par les parois du four et température de la surface externe des parois

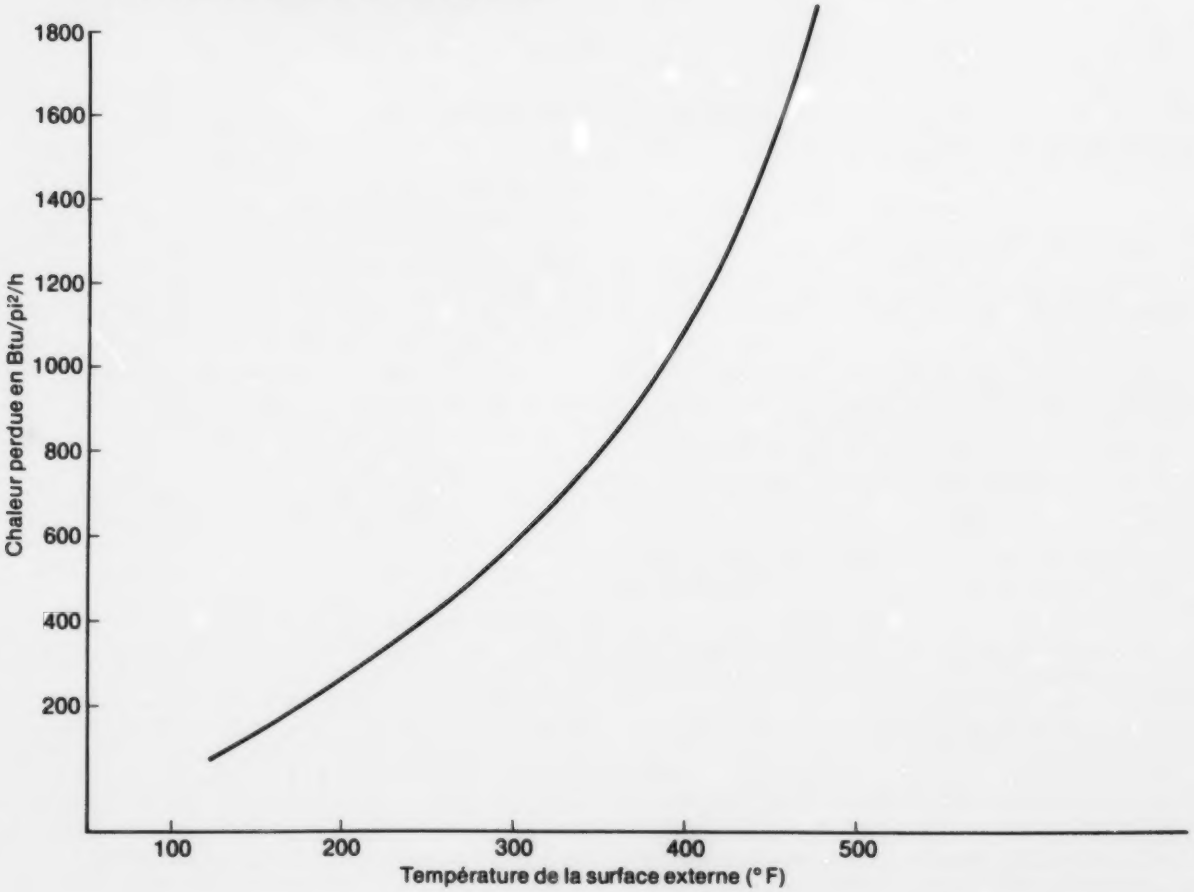
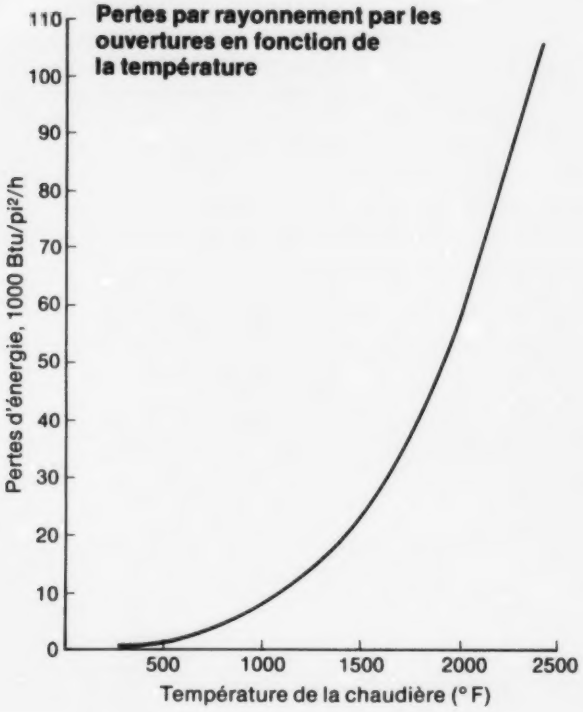


FIGURE 8

Pertes par rayonnement par les ouvertures en fonction de la température



irrégulières. Il servira également à mettre en évidence les points chauds, même les tout petits, causés par des dommages localisés au calorifugeage.

Lors de l'installation d'une nouvelle isolation ou de la réfection de l'équipement existant, il faut étudier sérieusement la possibilité d'installer des plaques de céramique au lieu de briques réfractaires. La céramique a des avantages particuliers:

- elle n'a que du tiers à la moitié de la conductivité thermique de la brique réfractaire et peut être installée en couches d'une épaisseur proportionnellement moindre.
- Sa capacité d'emmagasiner la chaleur est d'environ le dixième de celle d'une couche de briques réfractaires. Il s'agit là d'une propriété susceptible d'économiser l'énergie et de réduire le temps de mise en marche ou de réchauffement pendant le cycle d'une fournée.
- Elle ne risque pas de s'effriter ni de se craqueler sous l'action d'un échauffement et d'un refroidissement rapides.
- Sa légèreté en permet l'installation sans reconstruire le four.

Elle comporte cependant certains désavantages:

- Sa résistance étant très faible, elle ne peut être installée sur la sole d'un four ou en d'autres endroits où elle serait exposée au frottement.
- Comme ses propriétés isolantes dépendent de sa grande porosité, son emploi n'est pas à conseiller lorsque ses pores risquent d'être obstrués par la condensation des vapeurs ou d'autres particules.
- Elle est conçue pour être installée sur le côté chaud des parois du four. Un recouvrement de fibres sur le côté froid d'un four existant peut porter certaines couches de briques à une température supérieure à leur température de service utile.

Ouvertures et fuites

La déperdition de la chaleur par les ouvertures du four ou des fuites accidentelles dans le système peut être divisée en deux catégories: les pertes par convection, les pertes par rayonnement (exfiltration).

Le rayonnement est un phénomène perceptible; quand on peut voir l'intérieur incandescent d'un four, il y a indubitablement perte de chaleur par rayonnement. L'importance de cette perte est une fonction linéaire de la grandeur de l'ouverture et proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue.

Prenons un exemple simple: une fente d'une hauteur de 6 pouces sur une longueur de 8 pieds dans un fourneau de forge à 1134° C perdra de la chaleur par rayonnement à raison de 79 000 x (0.5 x 8) = 316 000 Btu/h. Et cela, en plus de toutes les pertes résultant des échappements de gaz par l'ouverture.

Les échappements de gaz par une ouverture ou une fuite ne représentent généralement pas une perte importante d'énergie. Si la fuite laisse échapper seulement des gaz chauds complètement brûlés provenant du four, elle représente une petite partie des gaz d'échappement qui se seraient autrement perdus dans la cheminée. Si la fuite laisse échapper de longues flammes sortant du four, elle représente une perte de chaleur importante pour le procédé. On peut corriger la situation en réparant la fuite ou en optimisant la forme de la flamme.

L'infiltration d'air froid dans le four peut, d'un autre côté, entraîner un important gaspillage d'énergie. Chaque livre d'air froid qui s'infiltre dans un four à 1134° C représente une perte de 510 Btu. Une telle infiltration est assez courante car, si le registre de la cheminée est mal ajusté, il tend à se former une légère dépression près du bas de la chambre de combustion. À cause de l'effet de cheminée, la pression sera plus basse sur la sole du four et s'élèvera graduellement jusqu'à la pression barométrique locale au sommet de la cheminée. La différence de pression, et de là, le volume de l'air infiltré et la quantité d'énergie perdue, dépendent de la température du four, de la distance entre la sole du four et le sommet de la cheminée et de la grandeur de l'ouverture par laquelle l'air froid s'infiltre.

Le tableau suivant illustre la relation entre les variables:

Perte de chaleur due à l'infiltration de l'air en BTU à l'heure par po² de l'ouverture

Température	Hauteur — Sole du four — Sommet de la cheminée					
°C	6′	8′	10′	12′	16′	20′
409	3600	4000	4800	5200	6100	6900
614	5500	6900	7500	8100	9800	11000
836	8200	10200	11200	11200	12700	17500
1040	10510	13200	14700	16500	18500	21300
1244	13500	16200	18100	20500	23200	25900

Ainsi, une ouverture de 8 pieds de long sur 6 pouces de haut dans un fourneau de forge de 1134° C, avec sortie de cheminée située à 12 pieds au-dessus de la sole du four perdrait, à cause des infiltrations d'air froid.

18 500 Btu/h/po² x (8 x 0.5) pi² x 144 po²/pi² = 10 600 000 Btu/h.

Cette quantité d'énergie est équivalente à 76 gallons américains de mazout numéro 2 à l'heure. Pour prévenir une perte excessive, un registre ou tout autre dispositif devrait être installé dans la cheminée afin de hausser la pression dans la chambre de combustion au niveau de la pression atmosphérique ou un peu plus. Une recommandation fréquente, même dans le cas d'ouvertures ou de fuites beaucoup plus petites que celles décrites ci-dessus, est d'installer un registre à contrôle automatique afin de maintenir une pression positive de 0,01 à 0,05 pouce d'eau. Ainsi, si des fuites se produisent, il s'agira de petites fuites extérieures qui gaspilleront beaucoup moins d'énergie que l'infiltration d'air froid.

Arrêt de l'équipement inutilisé

Lorsque l'équipement de chauffage est inutilisé soit pour des arrêts prévus ou des interruptions de production, il est presque toujours possible d'économiser de l'énergie en le laissant se refroidir et en le réchauffant par la suite. Si le temps d'interruption est court, il peut être préférable de laisser l'équipement atteindre une température intermédiaire, de le laisser en ralenti à cette température réduite pendant quelques temps puis de le ramener à la température normale de fonctionnement.
Malheureusement, il ne semble pas y avoir de règle qui permette de déterminer mécaniquement s'il vaut mieux arrêter l'équipement, le laisser fonctionner au ralenti à température réduite ou le maintenir à la température de fonctionnement. La meilleure décision dépend non seulement de la durée d'interruption prévue mais surtout des caractéristiques de chaque pièce d'équipement.

Pour prendre la décision la plus judicieuse, il faut disposer de plusieurs renseignements, à savoir:

1. Le temps nécessaire à l'équipement, brûleurs fermés, pour se refroidir à la température de la pièce de même qu'à plusieurs températures intermédiaires.
2. Les débits de combustibles nécessaires pour maintenir l'équipement au ralenti, à température de fonctionnement et à chacune des températures intermédiaires.
3. Le temps nécessaire pour réchauffer l'équipement à partir de la température de la pièce et de chacune des températures intermédiaires.
4. La quantité de combustible totale nécessaire pour réchauffer l'équipement à partir de chacune des températures ci-dessus.
5. Le taux maximum de changement de température qui n'endommagera pas l'équipement.

À partir de ces données, et d'un calendrier des interruptions anticipées, on peut finalement déterminer le cycle consommant le moins d'énergie.

Dans certains cas, le cycle d'interruption et de réchauffement avantageux peut entraîner des frais de main-d'oeuvres supplémentaires; dans d'autres cas, les produits et l'équipement risquent d'être endommagés par des changements trop brusques de températures. Ces inconvénients doivent bien sûr être mis en balance avec les économies d'énergie.

Calendrier des opérations à pleine charge

On admet généralement qu'il est plus avantageux de faire fonctionner de l'équipement de chauffage à sa charge nominale qu'à un régime de production réduit. Il est facile de confirmer cet avancé par des chiffres concrets.

Par exemple, prenons le cas d'un four à braser à marche continue, chauffé à raison de 5 x 10^6 Btu/h, qui a une capacité à pleine charge de 100 unités de produits à l'heure. Le bilan calorifique indique que 1 x 10^6 Btu suffisent à chauffer le produit (10 000 Btu/unité) alors que 4 x 10^6 Btu se perdent par la cheminée ou ailleurs. Il s'agit là d'un coefficient d'efficacité énergétique raisonnable pour des opérations de chauffage et de traitement.

Si le rythme de production est réduit au tiers de la capacité du four, on se retrouve devant une alternative:

1. Le four peut être exploité au rythme de 100 unités à l'heure, un jour ou une semaine sur trois. La consommation de combustible sera alors de 5 x 10^6 Btu/h ou 50 000 Btu par unité de produit, sans tenir compte de l'énergie nécessaire pour ramener le four à la température de fonctionnement.

2. On peut faire fonctionner le four tous les jours en n'y enfournant que 33 unités à l'heure. Dans ces conditions, le four continuera de gaspiller de l'énergie à raison de 4 MMBtu/h à l'heure et transmettra 330 000 Btu/h au produit. La consommation totale de combustible sera de 4 330 000 Btu/h ou:

$$\frac{4\,330\,000}{33} = 131\,000 \text{ Btu à l'unité.}$$

Le second terme de l'alternative constitue probablement la solution la plus pratique puisqu'il minimise les problèmes de manutention des matériaux, d'espace d'entreposage pour le stock destiné au travail en cours et qu'il élimine les effets néfastes sur le moral des ouvriers qu'ont parfois (pas toujours) les fréquents changements de tâches. Il augmente aussi de 81 000 Btu l'énergie utilisée par unité de produits.

Le premier terme, en dépit des inconvénients du calendrier d'exécution, est également très attirant.

Dans certains cas, il peut être désirable d'augmenter la production d'un four. Si, dans l'exemple précédent, il avait été décidé d'augmenter la production de 100 unités à 120 unités à l'heure, on aurait sans doute pu y parvenir en accélérant de 20 p. 100 la marche du convoyeur. Comme cela aurait eu pour effet de réduire la durée de séjour du produit dans le four, il aurait pu être nécessaire d'augmenter le coefficient de transmission de chaleur en haussant la température de l'atmosphère du four, ce qui aurait amené une augmentation de la consommation horaire de combustible. Cette hausse de température du four aurait en outre entraîné un accroissement des pertes par la cheminée et par les parois du four. Le plus grand volume de gaz chauds en circulation aurait accru la turbulence, augmentant de ce fait le transfert de chaleur au produit et les pertes par les parois.

Les résultats de tous ces changements contradictoires sont très difficiles à évaluer; il se peut que l'augmentation de production soit réalisable mais seulement au détriment de l'efficacité, c'est-à-dire en augmentant la quantité de combustible utilisé par unité de produit. Si le convoyeur a déjà une vitesse d'entraînement variable, il est possible de donner suite au projet et de produire un nouveau bilan calorifique. Sinon, il vaudrait mieux discuter du problème avec le fabricant du four ou un expert-conseil avant d'effectuer des modifications coûteuses et irréversibles.

Réduire les pertes d'énergie pendant les cycles

Lorsqu'on ouvre un four dormant afin d'en sortir une fournée et de la remplacer par une autre, il est évident qu'une grande quantité d'énergie se perd par rayonnement ou par infiltration d'air froid comme nous l'avons déjà mentionné. Une expérience relativement simple permet de mesurer l'étendue de la perte:

1. Ouvrer le four chauffé et retirez-en les produits comme à l'habitude.
2. Réenfournez tous les gabarits de montage et autres cadres normalement utilisés — sans produit. Pendant ces deux phases, le four devrait rester ouvert pour la durée normale de production.
3. Refermez le four et ramenez-le à la température de fonctionnement.

La quantité de combustible utilisée pendant le processus est une mesure directe de l'énergie perdue pendant le cycle.

La principale source de gaspillage d'énergie est la chaleur emmagasinée (chaleur sensible) dans les parois, la sole et le toit du four chaud. Les mécanismes de déperdition sont le rayonnement ou l'infiltration d'air froid par les portes ouvertes. La perte normale de chaleur par conduction des parois du four est généralement petite comparée aux pertes par portes ouvertes. Une autre source de gaspillage de chaleur, habituellement moins importante, est la chaleur sensible des gabarits de montages, cadres et convoyeurs qui doivent être réchauffés et refroidis à chaque cycle. Ces faits indiquent plusieurs techniques d'économie d'énergie.

Le passage de la chaleur par les portes ouvertes étant fonction du temps, on économisera de l'énergie en ouvrant les portes le moins longtemps possible. Si, par exemple, il faut attendre 10 minutes avant l'arrivée de la nouvelle fournée de produit à traiter, il importe de fermer la porte pendant la période d'attente.

Les gabarits du montage et les cadres d'appui doivent avoir la capacité calorifique minimale. En général, celle-ci est proportionnelle à leur masse. À noter qu'en ce qui concerne la capacité calorifique par livre, les métaux, pour la plupart, emmagasinent moitié moins de chaleur que la céramique.

Le meilleur moyen d'économiser l'énergie d'un four qui doit être soumis à un fonctionnement discontinu est d'utiliser un matériau isolant à très basse capacité calorifique par unité de volume, comme la fibre de céramique. L'analyse suivante est basée sur les données fournies par un fabricant de matériau isolant.

Un mur de briques réfractaires, conçues pour une température de four de 1040° C et une paroi froide de 94° C aurait une épaisseur d'environ 12 po et emmagasinerait 12 600 Btu/pi² de chaleur sensible. Dans un four de dimension intérieure de 8 pi x 6 pi x 5 pi, cela signifie l'emmagasinage de 2 970 000 Btu. Si le four refroidit à 818° C pendant le changement de fournée, la chaleur emmagasinée baisse à 2 510 000 Btu; la perte d'énergie est donc de 460 000 Btu.

Le calorifugeage de fibre de céramique d'autre part, n'aurait que 4,7 po d'épaisseur et n'emmagasinerait que 680 Btu au pied carré. La chaleur emmagasinée totale serait de 773 000 Btu,

la plus grande partie allant dans la sole de briques et la perte lors du refroidissement à 818° C serait de 114 000 Btu seulement. En supposant une perte par la cheminée de 45% pendant la période de réchauffement, l'économie en combustible due à l'isolation en fibre de céramique est la suivante:

$$\frac{(460{,}000 - 14{,}000)\ \text{Btu}}{(1\text{-}0.45) \times 180{,}000\ \text{Btu/gal}} = 4{,}5\ \text{gallons de combustible.}$$

Si la température tombe à 780° C pendant le cycle, on économisera 7,2 gallons de combustible.

Pour le réchauffement à partir de la température de la pièce, l'isolation en brique réfractaire consommerait 38,5 gallons de combustible, le calorifugeage en fibre de céramique, 9,5 gallons seulement.

Occasions diverses d'économiser l'énergie

Plusieurs pratiques et procédés qui entraînent un gaspillage d'énergie dans les fours et fourneaux passent souvent inaperçus. La liste ci-dessous n'est pas exhaustive mais elle couvre certains des points les plus importants:

- la publication de spécifications exagérées par le fabricant est quelquefois motivée par le désir d'avoir une importante marge de sécurité, par la résistance à changer un produit qui fonctionne bien ou par une mauvaise évaluation des coûts actuels de l'énergie et des hausses anticipées. C'est ce qui explique que certains fabricants prescrivent une couche carburée de 0,040 alors que 0,020 suffirait ou une période de séchage ou de cuisson de la peinture de pièces d'une heure alors que 20 minutes seraient suffisantes. Les ingénieurs concepteurs accueillent habituellement bien les suggestions permettant d'économiser l'énergie surtout lorsqu'on leur attribue une part du mérite.
- Les responsables de la production se rendent également coupables de gaspillage lorsqu'ils prolongent de deux heures le cycle nécessaire à la recuisson du métal ou qu'ils réchauffent un four plus tôt que nécessaire parce que c'est plus pratique. Il est nécessaire de sensibiliser les gens à l'importance d'économiser l'énergie.
- Des atmosphères de gaz de protection plus grandes que nécessaire sont aussi un gaspillage d'énergie tant à cause de la masse de gaz à chauffer dans le four que du pouvoir calorifique du gaz utilisé.
- Des gabarits de montage, convoyeurs et cadres massifs qui doivent être réchauffés ou refroidis à chaque fournée ou chaque passage dans un four à marche continue sont aussi une source de gaspillage incorporée. Les gabarits de montage doivent être aussi légers que possible; dans certains cas, il faut les éliminer complètement.
- Les rampes, supports, éléments de porte et autres pièces refroidies à l'eau gaspillent de l'énergie avec chaque gallon d'eau chaude versée dans le renvoi d'eau. On peut souvent les remplacer par des pièces faites d'alliages ou de céramique résistants à la chaleur; d'autre part, il est parfois possible de récupérer la chaleur de l'eau chaude.
- Certains problèmes d'oxydation ont été réglés à l'aide d'alliages coûteux alors qu'il aurait suffi de régler l'excès d'air pour que la proportion d'oxygène dans l'atmosphère du four n'excède pas 1 à 2 p. 100. Il s'agit là d'une mesure propre à économiser l'énergie tant dans la chaudière de traitement thermique que dans la préparation des alliages.

Contrôle continu du rendement

Même le four le plus efficace peut quelquefois se dérégler en l'absence d'une surveillance étroite.

Le plus important outil de contrôle est le compteur de combustible; il faudrait en munir chaque pièce d'équipement importante et en faire le relevé au moins chaque semaine, et de préférence au début ou à la fin de chaque poste de travail. Un tableau de la consommation de combustible par unité de production fera rapidement ressortir les modifications dans l'équipement ou les méthodes de production qui ont des effets néfastes sur le rendement énergétique. Et, ce qui est tout aussi important, il permettra d'évaluer l'efficacité d'un projet de conservation de l'énergie.

Le contrôle de la consommation de combustible est bien sûr le meilleur moyen de contrôler le rendement énergétique, mais il a aussi ses limites. Il peut mettre en évidence certaines causes de gaspillage d'énergie, particulièrement en ce qui concerne les modifications aux programmes comme les trop longs arrêts de la production, les changements dans la dimension des fournées et dans le type des produits et ainsi de suite. Dans le cas des autres causes possibles du gaspillage d'énergie comme des changements dans la quantité d'air comburant, le contrôle du combustible ne pourra que révéler les effets sans donner d'indices quant aux causes. Un contrôle supplémentaire s'impose donc.

Une analyse complète des gaz de carneau est aussi un instrument très utile pour contrôler le rendement d'un four et elle devrait être exécutée périodiquement. Le calendrier des travaux pourrait en prévoir une par mois, ou même plus.

Des analyseurs en continu des gaz de carneau (oxygène) sont recommandés pour tous les appareils qui consomment beaucoup de combustible. Faits sur une base horaire, les relevés, de même que les autres paramètres importants, particulièrement la température de sortie, devraient être inscrits dans un registre permanent. Toute fluctuation des relevés devrait être étudiée pour en déterminer la cause (modification dans l'excès d'air ou les infiltrations ou même la qualité du combustible). L'achat d'un analyseur peut se justifier par sa rapidité à déceler

les défectuosités et les économies de combustible et de matériaux de production qu'il permet.

On n'installe pas souvent de thermomètre pour les gaz de carneau puisque l'on peut supposer que leur température est directement liée à la température de contrôle dans le four. Cependant, lorsqu'un récepteur ou un autre dispositif de récupération de la chaleur perdue est installé, la température des gaz de carneau sortant de l'échangeur de chaleur doit être mesurée. Un changement de la température, s'il n'est pas accompagné d'un changement de température dans le four, indiquerait alors que l'échangeur ne fonctionne pas correctement et qu'il a besoin d'entretien ou de réparation.

Aucun instrument de contrôle ne peut remplacer un programme efficace d'entretien préventif. L'inverse est également vrai, les meilleures techniques d'entretien ne peuvent accomplir le même travail qu'une bonne instrumentation. Afin d'exploiter rationnellement l'énergie, l'entretien et le contrôle par instruments sont nécessaires.

Méthodes de mesures pour les bilans calorifiques

Nous avons déjà vu que la mesure des facteurs comme la consommation de combustible, les températures, l'analyse des gaz de carneau et ainsi de suite est nécessaire à l'établissement d'un bilan calorifique et à l'évaluation de l'efficacité globale d'un four ou d'une fourneau. Quelques suggestions de base concernant ces mesures sont de rigueur.

Mesure de la consommation de combustible

L'instrument idéal pour mesurer la consommation de gaz ou de mazout d'un four est un compteur-totalisateur volumétrique du genre qu'utilisent les détaillants de combustible. Si le relevé est fait à toutes les heures ou même une fois par poste de travail, il est facile d'établir la consommation horaire du four. Le compteur peut de plus être facilement changé de four pourvu que les raccords et les soupapes voulus soient installés dans le tuyau d'alimentation en combustible de chaque four.

Des débitmètres, comme un diaphragme ou un rotamètre, sont généralement moins couteux et peuvent mesurer adéquatement les débits réguliers sur une longue période. Ils ne sont cependant pas suffisants si le système de contrôle de la température fait fréquemment d'importants changements dans l'alimentation en combustible. Dans de tel cas, un compteur totalisateur est essentiel. Les débitmètres peuvent servir à s'assurer que le combustible est adéquatement distribué entre les brûleurs d'une installation à brûleurs multiples. On installe alors un débitmètre sur chaque brûleur.

Tous les instruments de mesure devraient être choisis en fonction du travail à exécuter. Par exemple, si un four utilise 100 pi³/h de gaz, le compteur utilisé doit pouvoir indiquer des volumes aussi petits que 1 pied cube. Par contre, si le four utilise 10 000 pi³/h, une graduation par 100 pieds cubes suffit.

Mesure de l'apport énergétique — fours électriques

Dans le cas présent, le débit instantané d'énergie électrique peut être facilement mesuré à l'aide d'une pince ampèremétrique. Cet instrument mesure la consommation de courant en ampères lorsqu'un des fils du four est muni de la pince à ressort de l'instrument. Le débit (puissance) en watts est simplement l'ampérage multiplié par la tension appliquée ou, s'il s'agit d'éléments chauffants multiples reliés à un réseau triphasé, il correspond à l'ampérage multiplié par le voltage multiplié par la racine carrée de 3 (1,732).

Si le système de contrôle de la température est du type à interruption complète, on peut mesurer l'énergie en branchant une horloge électrique aux bornes du fil chauffant afin d'indiquer la durée totale de chauffage. Par exemple, si au bout de 8 heures, l'horloge indique 5,5 heures et les éléments ont tiré 15 kilowatts, la consommation moyenne d'énergie est $15\text{Kw} \times \frac{5.5\text{ h}}{8\text{h}} = 10{,}3\text{ Kw}$.

Si la température est contrôlée par un clapet, comme dans les transformateurs à inductance variable ou les thyristors, il faut utiliser un compteur de kilowatts-heures du genre utilisé par les sociétés d'électricité.

Mesure des températures.

Pour les gammes de températures qui nous concernent, un thermocouple est de loin le dispositif le plus utile et le plus commode; les thermomètres à liquide ou à bilame sont quelquefois moins coûteux; cependant ils sont limités à des températures inférieures à 409° C et les relevés peuvent être difficiles si les thermomètres sont placés dans des endroits peu accessibles.

Lorsqu'il s'agit de mesurer la température des gaz de carneau d'un four, la température doit, autant que possible, être prise au point où les gaz de carneau quittent la chambre de combustion. Si les mesures sont prises après que le gaz s'est refroidi que ce soit par rayonnement à travers les parois de la tuyauterie ou par infiltration d'air froid, le bilan calorifique en résultant sera erroné. Si les gaz du carneau provenant de la chambre de combustion sont transmis à un dispositif de récupération de la chaleur, (récupérateur, échangeur de chaleur, chaudière de récupération, etc.) les mesures de température doivent être faites à la sortie de la chambre de combustion et à la sortie du dispositif de récupération. Les deux mesures sont nécessaires afin de s'assurer que l'échangeur de chaleur fonctionne correctement.

Analyse des gaz de carneau

Comme nous l'avons vu dans la partie de la présente brochure qui traite des chaudières, l'analyseur Orsat est depuis longtemps considéré comme l'instrument classique pour l'analyse des gaz de carneau. Il indique la proportion de chacun des gaz suivants, en volume:

- gaz carbonique — un indicateur de la quantité d'excès d'air.
- Oxyde de carbone — une proportion supérieure à 0,1% est un indice d'une combustion incomplète.
- Oxygène — est un indicateur général de la quantité d'excès d'air, peu importe le combustible utilisé.
- Azote — n'est pas analysé directement mais est supposé constituer le reste de l'échantillon.

L'eau est condensée pendant la préparation des échantillons. La quantité présente dans les gaz chauds peut être estimée à partir de la proportion d'excès d'air et de la connaissance du type de combustible utilisé.

Un dispositif plus simple et moins coûteux que l'analyseur Orsat ne mesure que le CO_2 par absorption chimique et est communément utilisé par les techniciens lors du réglage des chaudières domestiques. Il peut être utilisé à titre de guide mais n'est pas absolument précis.

Plusieurs instruments électroniques peuvent être installés afin de contrôler continuellement les gaz de carneau. Les unités à infrarouge pour mesurer la teneur en gaz carbonique ou les unités à oxyde paramagnétique ou à oxyde de zirconium pour mesurer la teneur en oxygène transmettent des données permanentes et précises sur les changements des conditions de combustion. Lorsque le type de combustible ou sa composition peuvent varier, l'analyseur à oxygène est préférable à l'unité au CO_2.

Afin de contrôler le rendement des brûleurs, des échantillons devraient être prélevés aussi près que possible des brûleurs si l'on croit qu'il se produit de l'infiltration. Des mesures plus poussées en aval peuvent indiquer les fuites où se produit la perte de chaleur.

Mesure du débit des gaz à basse pression

Si la quantité d'excès d'air dans un four ou fourneau doit être supérieure à environ 200%, une analyse Orsat est très imprécise pour calculer l'écoulement massique et la perte par la cheminée. Il faut donc avoir recours à des mesures directes du débit de gaz soit au niveau de l'arrivée d'air, dans la cheminée ou dans tout autre point facilement accessible du système.

Les débitmètres, qui provoquent tous une légère baisse de pression du fluide, ne doivent pas être utilisés dans le système de combustion où la pression ne dépasse généralement pas 1 à 4 pouces d'eau. Le choix des instruments est, dès lors, assez restreint.

Le tube de Pitot est en fait constitué de deux tubes dont l'un possède une ouverture face au flux de gaz. La différence de pression entre les deux tubes est une indication de la vitesse du gaz. Les tubes de Pitot peuvent être utilisés dans les tuyaux de 4 po de diamètre ou plus et peuvent mesurer une gamme très étendue de vitesses de gaz à toutes les températures acceptées par les matériaux constituants du tube. Pour une plus grande précision, le tube de Pitot doit être précédé et suivi d'une section droite de tuyau d'une longueur correspondant à dix fois le diamètre de la canalisation. Un anémomètre à fil chaud indique la vitesse du gaz en mesurant l'effet refroidissant d'un jet de gaz sur un fil chauffé à l'électricité. Ils sont disponibles en modèles fixes et portatifs. Leur fonctionnement est limité à au plus 120° C.

Les anémomètres mécaniques utilisent un ventilateur ou une turbine dont la vitesse de rotation est fonction de la vitesse du liquide d'entraînement. Dépendamment de leurs usages, modèles portatifs pour mesurer la vitesse de l'air ambiant ou modèles pour installation permanente dans les pipelines, leur coût et leur complexité varient grandement. Pour des raisons mécaniques, leur usage est généralement limité à des températures inférieures à 94° C.

En général, tous ces dispositifs sont sujets à des erreurs importantes si on laisse s'accumuler des dépôts gommeux ou des particules étrangères. C'est pourquoi il faut les nettoyer souvent ou compter sur l'analyse Orsat et calculer le débit de gaz.

Différents types de fours et fourneaux

Les mesures et les calculs nécessaires à un bilan calorifique se font selon des principes identiques pour chaque type d'équipement de chauffage industriel. Ils ont pour but, bien entendu, de déterminer, de mesurer ou d'évaluer toutes les arrivées et les sorties d'énergie de l'équipement. En ce sens, le travail est le même qu'il s'agisse d'un four à tremper à caisson électrique, d'un four à cloche, un four à céramique en brique ou d'un four à pain continu. Il existe néanmoins des différences marquées dans les méthodes de travail recommandées pour chaque type d'équipement.

Fours à flamme directe

Les fours à flamme directe sont ceux où le produit de la combustion (gas de carneau) vient en contact direct avec le produit à chauffer. Cette catégorie peut être subdivisée en fours dormants ou continus.

Les fours dormants à flamme directe incluent les fours commerciaux suivants:

Fours caissons

Fours à sole mobile

Fours pit

Fours cloches

Fours à cuve rotative (quelques uns)

Ces fours peuvent être de plus classés selon leurs usages comme le brasage, l'étirage, la trempe, le forgeage et ainsi de suite.

L'exemple d'un chapitre précédent illustre un bilan calorifique pour ce type de four. Il faut surveiller les facteurs spécifiques suivants, en plus du rapport air-combustible, de l'isolation et de la récupération des chaleurs perdues:

- des ouvertures et fermetures fréquentes du four provoquent souvent des fuites aux joints d'étanchéité ainsi que des pertes d'énergie par infiltration d'air froid. Ce phénomène est particulièrement remarquable en ce qui concerne les joints qui réunissent les bords d'un four à sole mobile. Les inspections et l'entretien réguliers sont importants.

- L'infiltration d'air par des fuites inévitables peut être prévenue ou minimisée en installant un registre à contrôle automatique afin de maintenir une pression équilibrée dans la chambre de combustion.

- Une source très évidente de perte d'énergie dans un four dormant est la chaleur qui s'échappe pendant l'enfournement. On peut mesurer cette perte en calculant le débit de combustible du moment où la porte est ouverte à celui où elle est refermée sur la nouvelle fournée et où commence le nouveau cycle. Bien que l'on ne se soit pas attardé à ce type de perte dans le bilan calorifique décrit précédemment, il est évident qu'il faut en tenir compte dans le calcul de la consommation globale de combustible par unité de production.

- Un cycle unique de traitement utilisera bien entendu moins d'énergie si les parois de la chaudière sont relativement chaudes lorsque commence le cycle; par conséquent, on doit réduire au maximum le temps d'ouverture de la porte entre les fournées.

Un autre type, le four à flamme directe continu, est un four dans lequel le matériau est placé ou retiré à intervalle régulier ou par intermittence c'est-à-dire sans fournée distincte.

Les fours commerciaux comprennent:

Fours continus à tablier

Fours à rouleaux (sole mobile)

Fours à sole rotative

Fours à sole oscillante

Fours de forge à ouvreau

Fours poussants

Fours à cuve rotative (quelques unes)

Fours rotatifs et autres

Le bilan calorifique d'un four continu est essentiellement le même que celui d'un four dormant: cependant, il faut tenir compte de certains facteurs:

- puisqu'il n'y a pas de durée définie pour le cycle de traitement, il faut effectuer les mesures et les calculs périodiquement, par exemple à toutes les heures ou à tous les postes de travail. Idéalement, les bilans calorifiques doivent être établis dans des conditions de marche à vide (sans charge) et de fonctionnement à la capacité nominale (pleine charge). On peut évaluer la consommation de combustible aux charges intermédiaires à partir de ces données.

- Comme les portes du four sont ouvertes presque continuellement pour l'enfournement et le défournement, la déperdition d'énergie est plus importante qu'avec un four dormant. On recommande de maintenir une pression légère positive dans le four.

- Le rayonnement par les portes ouvertes risque d'être une cause de pertes importantes; celles-ci peuvent être considérées à part dans le bilan calorifique. Il est évident que ces ouvertures doivent être aussi petites que possible.

- Dans certains fours continus, les dispositifs de manutention des matériaux (tabliers, rouleaux) sont entièrement situés dans la zone chaude. Certains autres, cependant, ont un transporteur à tablier qui sort de la zone chaude et retourne à la température ambiante. Le cas échéant, l'énergie nécessaire pour réchauffer le tablier doit être considérée comme une perte (sortie énergétique), lors du calcul du bilan calorifique.

Fours à flamme indirecte

Il s'agit de fours où les gaz de combustion ne viennent pas en contact avec le produit, soit pour protéger le produit d'une surchauffe localisée où, plus fréquemment, pour permettre un contrôle chimique précis de l'atmosphère du four (par exemple, atmosphère oxydante, réductrice, neutre, de cémentation et ainsi de suite).

Il peut s'agir de fours dormants ou continus, de l'un ou l'autre des types énumérés pour les fours à flamme directe. On peut en outre les diviser en.

Fours à mouffle

Fours à atmosphère contrôlée

Fours à tube radiant

Fours à cémenter

Fours à carbonitrurer

Fours à bain de sel

Ces différentes catégorisations peuvent donner lieu à des appellations du genre: four caisson à tube radiant, à atmosphère contrôlée, de trempage.

Le bilan calorifique d'un four à flamme indirecte où l'air atmosphérique est en contact avec le produit s'établit presque de la même façon que celui d'un four à flamme directe équivalent. Il y a cependant deux petites exceptions:

- Si l'air est aspiré de propos délibéré dans le laboratoire, par exemple pour refroidir le produit avant de le défourner, le volume et la température de sortie de cet air doivent être mesurés et le pouvoir calorifique, ajouté à la sortie d'énergie.
- Si l'air ne circule pas dans le laboratoire, c'est-à-dire si la porte est fermée aussi hermétiquement que possible, il n'y aura pas cette tendance à l'infiltration d'air comme c'est le cas pour le four à flamme directe. Il est inutile et même déconseillé de tenter de maintenir une pression positive dans le laboratoire.

Dans un four à atmosphère contrôlée, le laboratoire est vidé de tout l'air à l'aide d'un gaz spécial; le débit de gaz est maintenu pendant toute la cuisson afin de maintenir une pression légèrement positive. Il faut tenir compte du débit énergétique dû au contrôle de l'atmosphère.

Lors du calcul du bilan calorifique, il faut considérer le générateur de gaz comme partie intégrante du même système que le four lui-même; l'énergie utilisée par le générateur par heure ou par cycle est considérée comme un apport énergétique. Puisque seul un infime pourcentage de l'atmosphère se combinera au produit, cette même quantité d'énergie devient une sortie de chaleur perdue.

La liste ci-dessous indique les modes de calcul de la capacité calorifique des différents types d'atmosphères de four.

- Pour les générateurs de gaz exothermiques, le contenu énergétique est considéré comme étant le pouvoir calorifique du combustible fourni au générateur.
- Pour les générateurs de gaz endothermiques, le contenu énergétique est le pouvoir calorifique du gaz introduit, y compris celui utilisé pour le chauffage des tubes du générateur.
- L'amoniaque dissociée a un pouvoir calorifique de 16 000 Btu/lb (490 Btu/pi^3), plus l'énergie utilisée pour le chauffage externe des tubes du générateur.
- Si l'un ou l'autre des gaz ci-dessus est conditionné par le retrait de la vapeur d'eau ou du gaz carbonique, l'énergie utilisée pour ce conditionnement doit être ajoutée à l'apport énergétique.
- L'hydrogène pur a un pouvoir calorifique de 61 100 Btu/lb ou 325 Btu/pi^3.
- L'azote, liquide ou sous pression, n'a aucun pouvoir calorifique.
- Le propane utilisé pour la préparation du gaz enrichi a un pouvoir calorifique de 32 000 Btu/lb, 91 000 Btu/gal. ou 2500 Btu/pi^3.

La nécessité d'ajouter un compteur de gaz à un générateur d'atmosphère découle de ce qui précède. Si un générateur central sert à fournir le gaz d'atmosphère à un groupe de fours, il peut être utile de mesurer le combustible fourni au générateur et d'évaluer sa répartition entre les fours.

Types spéciaux de fours à flamme indirecte

a. Fours à bain de sel

Le four à bain de sel (en fusion) est un type spécial de four dormant à flamme indirecte et à atmosphère contrôlée. Son bilan calorifique peut être calculé comme celui d'un four dormant à flamme directe dont le cycle serait habituellement assez court. La seule exception est la nécessité de déterminer la quantité de sel de remplacement introduit à chaque cycle, de calculer l'énergie nécessaire pour fondre le sel et l'amener à la température de fonctionnement et de classer l'énergie ainsi consommée comme sortie dans le bilan calorifique.

Les pertes par rayonnement par la surface à l'air libre d'un four à bain de sel peuvent être très importantes. Il faut les évaluer et les ajouter aux sorties dans le bilan calorifique.

b. Cémentation en tas

Techniquement, la cémentation en tas ou en caisse est une opération à atmosphère contrôlée et flamme indirecte qui est généralement effectuée dans un four dormant à flamme directe. La chaleur nécessaire pour chauffer la caisse de cémentation et son contenu fait partie de la sortie énergétique dans le bilan calorifique. Le pouvoir calorifique du cément, le charbon par exemple, est additionné à l'apport énergétique dans le bilan calorifique. Si l'on récupère une partie du charbon pour le réutiliser, on ne tiendra compte que de la quantité de charbon nouveau ajouté à chaque fournée. Pour économiser l'énergie, le poid à vide de la caisse par livre de produit, de même que la quantité de cément utilisé, doivent être les plus faibles possible.

c. Fours à générateur d'air

Les ventilateurs de recirculation mélangent ou brassent l'atmosphère du four. Ils y rendent ainsi la température plus uniforme et, à des températures plus basses, ils peuvent augmenter le coefficient de transmission de chaleur au produit. Comme les systèmes de recirculation n'enlèvent ni n'ajoutent de l'énergie dans les fours, il est généralement permis de ne pas en tenir compte dans le bilan calorifique. Lorsque des parties du système sont situées à l'extérieur de la zone chaude, elles sont des foyers possibles de perte d'énergie par rayonnement ou convection. Les canalisations et enveloppes de ventilateurs extérieures doivent être bien isolées.

Séchoirs

On peut définir le séchoir comme étant un équipement de chauffage ayant pour but d'éliminer une substance volatile comme l'eau ou un solvant organique. Ils peuvent être intermittents ou continus. Le nom commercial du séchoir se rapporte habituellement au produit traité:

Séchoir à peinture

Séchoir à céramique

Séchoir à bois

Four continu de boulangerie

Séchoir à cuve rotative

Les séchoirs fonctionnent généralement à basse température (66° — 260° C). En dépit de ce fait, les pertes de chaleur par rayonnement ou convection provenant des parois peuvent être très importantes, puisque les parois sont habituellement très grandes et les cycles très longs.

De plus, les séchoirs fonctionnent souvent avec d'assez grandes quantités d'excès d'air (200-1000%) afin d'obtenir un séchage rapide et de prévenir la formation d'une atmosphère détonnante lorsque le solvant est combustible. Lorsque l'excès d'air est supérieur à environ 200%, une analyse des gaz de carneau devient très imprécise et il faut mesurer directement le débit d'air ou de gaz de carneau afin d'évaluer la perte par la cheminée. De toute évidence, la quantité d'excès d'air ne doit pas être supérieure aux besoins réels du procédé de traitement.

Quelques autres facteurs relatifs au séchoir:

- lorsque le solvant évaporé est combustible, le pouvoir calorifique (chaleur de combustion) doit être ajouté à l'apport énergétique dans le bilan calorifique.
- Les règlements relatifs à la pollution atmosphérique exigent que les hydrocarbures comme les solvants à peinture soient éliminés avant que le gaz ne soit libéré dans l'atmosphère. On peut y parvenir par différents moyens, le plus commun étant de brûler plus de combustible avec le gaz brûlé et d'élever sa température à environ 818° C. Quelle que soit la méthode, cette opération d'assainissement doit être considérée comme une partie intégrante du système, et toute l'énergie ajoutée pendant cette opération constitue un apport énergétique aux fins du bilan calorifique.
- Les séchoirs ont généralement de très fortes pertes par la cheminée étant donné qu'il faut y maintenir de forts pourcentages d'excès d'air et y incinérer les vapeurs d'hydrocarbures. Une attention spéciale doit être apportée aux moyens de récupérer cette chaleur perdue et de la retourner dans le système.
- Les séchoirs font quelquefois partie d'un système plus complexe. Par exemple, dans un système combinant un four continu à briques et un séchoir, il peut y avoir différentes zones, notamment pour sécher l'eau, pour augmenter lentement la température au niveau de fonctionnement, pour chauffer les briques et les refroidir à une vitesse contrôlée. Les briques peuvent être asséchées grâce à l'air chaud récupéré dans la zone de refroidissement du four.

Pour calculer un bilan calorifique, il faut traiter le tout comme un système unique et ne considérer que l'apport et la sortie énergétiques globales. En cas de nécessité, il est possible de n'évaluer que le bilan énergétique d'une seule partie du système, comme la zone de séchage.

Fours électriques

Tous les types de fours ou fourneaux décrits précédemment peuvent être chauffés à l'électricité tout autant que par la combustion directe de combustible fossile. Le cas échéant, il faut cependant tenir compte de certains facteurs spéciaux lors de l'établissement du bilan calorifique.

En l'absence de produit de combustion, il n'y a pas de pertes par la cheminée dans le sens usuel du mot. Si le principe est appliqué à un séchoir ou à un four à atmosphère contrôlée, il faut bien sûr tenir compte du débit énergétique associé à l'air d'assèchement ou à l'atmosphère spéciale du four.

Le bilan calorifique d'un four électrique, établi à l'aide d'un facteur de conversion de 3412 Btu/Kwh, indiquera normalement une arrivée de chaleur inférieure à celle requise par un four équivalent qui fonctionnerait au gaz ou au mazout. Néanmoins, le prix élevé du Btu d'électricité annulera fréquemment les économies apparentes.

Pour comparer un four au gaz ou au mazout à son équivalent électrique sur une base de combustible fossile brûlé au lieu de coût, la valeur du kilowatt/heure doit être fixée à 10 — 12000 Btu. Il s'agit là de la valeur du combustible consommé par une centrale pour produire 1 kilowatt/heure d'électricité valant 3 412 Btu pour le chauffage. La perte au niveau de la centrale est, bien entendu, transmise dans le coût de l'électricité.

Considérations financières

Les chapitres précédents contiennent certaines suggestions pour économiser l'énergie dont la mise en oeuvre exigerait des dépenses d'investissement. Les économies annuelles sont parfois si importantes et les investissements si réduits que la nécessité d'implantation du projet est évidente. Dans d'autres cas, une analyse plus détaillé est nécessaire.

Le Guide et Index traite de deux des nombreuses procédures utilisées pour l'analyse financière des

possibilités d'économie. Un facteur important de l'analyse est le prix actuel de l'énergie consommée.

L'établissement des coûts énergétiques permet une analyse valable des mesures possibles pour économiser l'énergie et réduire les coûts. Ces derniers varient grandement selon la source du combustible utilisé.

Chaudières industrielles

De tous les systèmes de combustion, les chaudières industrielles sont parmi les plus gros consommateurs d'énergie. En fait, on peut facilement dire qu'environ 40% de l'énergie totale consommée au Canada est utilisée dans le secteur industriel. De ces 40%, environ 11% sert au chauffage à flamme directe — un bon 16% allant à la production de vapeur. De toute évidence, des améliorations apportées au rendement des chaudières pourraient réduire considérablement la quantité de combustible consommé à l'échelle nationale. Mais, et ceci peut être encore plus intéressant à court terme, en améliorant le rendement des chaudières, l'industrie canadienne pourra généralement réduire sensiblement ses frais d'exploitation.

Pour un rendement maximal

Le but fondamental de tout système de chauffage industriel est de transformer l'énergie contenue dans les composées chimiques du combustible en chaleur et de transmettre cette chaleur à un fluide caloporteur comme la vapeur, l'huile ou l'air. Le contenu énergétique du combustible est défini par son pouvoir calorifique, c'est-à-dire le nombre de British Thermal Units (Btu) contenus par unité de poids ou de volume du combustible. Les ingénieurs en combustion font généralement la distinction entre ce qu'ils appellent le "pouvoir calorifique inférieur" (PCI) et le "pouvoir calorifique supérieur" (PCS) du combustible, la différence étant la petite quantité de chaleur associée à la condensation d'humidité dans le gaz de carneau. Dans le domaine des chaudières on utilise communément le PCS. Voici une liste de PCS correspondant aux combustibles les plus courants:

Gaz naturel — 1 000 Btu/pi^3

Mazout
N^O 2 — 166 000 Btu/gal.
N^O 6 — 180 000 Btu/gal.

Charbon
Houille grasse — 14 000 Btu/lb
Houille maigre — 10 500 Btu/lb
Lignite — 7 500 Btu/lb

Une fois encore, on devrait utiliser le plus possible du combustible pauvre afin de conserver le combustible riche pour des usages judicieux. Dans la chambre de combustion, le combustible est mélangé à l'air et enflammé, ce qui cause l'oxydation rapide du carbone, de l'hydrogène et du soufre contenu dans le combustible et libère l'énergie de liaison chimique. Une quantité précise d'air est nécessaire pour fournir une molécule d'oxygène à chaque molécule de combustible. Cette quantité précise est connue sous le nom d'air théorique 100 p. 100, d'air théorique ou d'air stoenchiométrique. Si moins de la quantité théorique d'air nécessaire est introduite dans la chambre de combustion, il y aura insuffisance d'oxygène et une partie du combustible se perdra dans la cheminée. Si plus que la quantité nécessaire d'air théorique est fournie (ce qui est presque toujours le cas en pratique pour des raisons que nous verrons plus tard), la chambre de combustion fonctionne avec un excès d'air, habituellement exprimé en pourcentage de l'air théorique. Par exemple, une chaudière au gaz peut fonctionner avec environ 35 p. 100 d'excès d'air ou 1,35 fois la quantité d'air théorique requise.

Le mélange des gaz qui résulte de la combustion, formé principalement de gaz carbonique, de vapeur d'eau, d'azote et d'oxygène, constitue les gaz de carneau. Alors qu'une partie de la chaleur produite par la réaction de combustion est transférée directement à la vapeur ou au liquide caloporteur par rayonnement de la flamme éclairante de la chambre de combustion, une quantité substantielle de chaleur reste dans les gaz de carneau en circulation dans la chaudière. Lorsque les gaz chauds s'élèvent dans la cheminée, on en extrait de la chaleur au moment où ils passent sur des rangées de tubes placées dans leur trajectoire. Ces rangées de tubes, connues sous le nom de sections de transfert thermique, sont un équipement de récupération de la chaleur auquel il est très important de songer lorsqu'on veut ajouter au rendement énergétique d'une vieille chaudière.

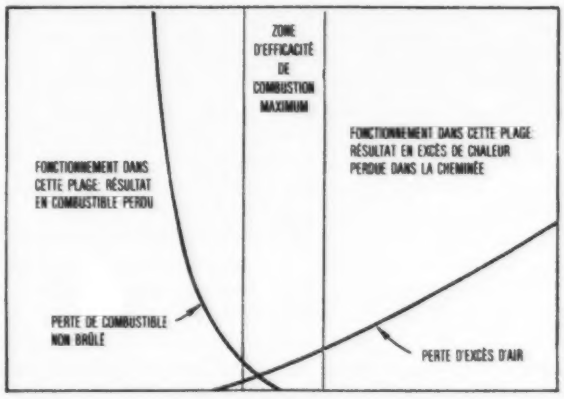
L'objectif ultime est, bien entendu, de transmettre la chaleur à un fluide caloporteur qui peut être utilisé dans le procédé. Le rendement d'une chaudière (ou élément chauffant) dépend du succès de l'opération. On établit le rendement d'une chaudière en divisant la quantité de chaleur transférée au fluide caloporteur par le pouvoir calorifique chimique du combustible qui arrive dans le système. Le rendement de la chaudière est le chiffre qui nous intéresse le plus car il représente l'énergie utile produite par rapport à l'énergie théoriquement disponible. Dans les chapitres qui suivent, nous utiliserons le terme "rendement de chaudière", qui s'appliquera également de façon implicite aux dispositifs de chauffage utilisant un fluide caloporteur autre que l'eau.

Paramètres influant sur le rendement d'une chaudière

De nombreuses variables de fonctionnement et de conception ont des effets considérables sur le rendement d'une chaudière. Il est important que chacun de ces facteurs soit compris si l'on veut étudier les diverses mesures possibles pour améliorer le rendement.

FIGURE 9

Paramètres influant sur le rendement d'une chaudière



Propriétés du combustible: les propriétés du combustible utilisé dans une chaudière ou un dispositif de chauffage ont une influence importante sur le rendement. Pour obtenir une combustion adéquate, le combustible doit être bien mélangé à l'air comburant. Cette opération est assez compliquée, surtout si on utilise des combustibles liquides ou solides. Lorsque du mazout est brûlé, il doit être pulvérisé en fines gouttelettes comportant une large surface exposée à l'air. La densité, la viscosité et la tension superficielle du mazout sont des facteurs très importants dans la pulvérisation et le mélange. Ces facteurs étant très sensibles à la température, il est nécessaire de maintenir le combustible à la température convenant au brûleur. C'est particulièrement important lorsqu'on utilise des combustibles résiduels lourds (comme le mazout n° 6 ou n° 4.

Une autre propriété très importante est le pouvoir calorifique du combustible. Cette propriété est déterminée par la composition chimique du combustible et sa teneur en eau.

Excès d'air: la quantité d'excès d'air utilisé pour la combustion est une variable cruciale dont dépend le rendement de la chaudière. Le diagramme indique pourquoi. Comme nous l'avons déjà vu, une quantité minimale d'air est nécessaire afin de fournir la quantité adéquate d'oxygène pour faire entrer en réaction toutes les constituantes combustibles. En pratique, il est toujours nécessaire de fournir un peu plus que les besoins théoriques puisque le processus de mélange n'est jamais parfait et qu'une partie de l'oxygène amenée pour la combustion ne vient pas en contact avec les molécules des éléments combustibles. S'il n'y a pas suffisamment d'air, une partie du combustible se perd dans la cheminée sous forme d'imbrûlés. De grandes quantités de combustible imbrûlé peuvent provoquer une perte importante de chaleur, bien que cela soit assez rare. Plus communément, l'excès d'air dépasse sensiblement les besoins et de grandes quantités de chaleur se perdent dans la cheminée. Pour améliorer l'efficacité, il faut tenter d'exploiter la chaudière avec le moins d'excès d'air possible. En fait, contrôler la combustion consiste à rester en équilibre entre l'excès et la carence d'air.

Température des gaz brûlés: puisqu'elle représente une mesure de la chaleur non récupérable perdue dans l'atmosphère, la température des gaz de carneau s'échappant par la cheminée est un indice important du rendement d'une chaudière. Lorsqu'on envisage l'installation d'un équipement de récupération, il faut se rappeler que la température des gaz de carneau—moins quelque 25°C — correspond à la chaleur maximum à laquelle on pourrait porter un fluide. Sa valeur courante indiquera donc des utilisations possibles pour la chaleur récupérée. Les risques de corrosion fixent cependant un plancher à la température souhaitable des gaz brûlés. Lorsqu'on se sert du mazout comme combustible, il est particulièrement important de maintenir une température des gaz brûlés suffisante pour éviter la condensation de l'eau et des vapeurs d'acide sulfurique sur les parois de l'appareil de chauffage et de la cheminée.

Conditions d'utilisation de la vapeur et du fluide caloporteur: la température, la pression et le débit du fluide caloporteur sont des éléments très importants de la sortie énergétique d'une chaudière ou d'un appareil de chauffage. Il s'agit, par conséquent, de données essentielles pour évaluer le rendement d'une chaudière. En plus d'être un indice de l'état de marche d'une chaudière, des variations dans ces facteurs peuvent elles-mêmes influer sur le rendement de l'appareil, par exemple le coefficient de transmission de la chaleur entre les gaz de carneau à une certaine température et la vapeur qui circule dans un tuyau, dépend partiellement de la vitesse d'écoulement de la vapeur. De même, la température de la vapeur (et, par association, sa pression) influent sur le coefficient de transmission de la chaleur. Ainsi, une chaudière peut avoir un rendement différent, selon les charges. Ces effets se font moins sentir lorsque la chaleur est transmise à un liquide (comme dans le cas d'un réchauffeur d'eau d'alimentation) plutôt qu'à un gaz comme de la vapeur ou de l'air.

Tous ces paramètres sont reliés entre eux par les mécanismes complexes de combustion et de transmission de la chaleur qui entrent en jeu dans une chaudière ou un dispositif de chauffage. Par exemple, à un combustible inadéquat il faut un surplus d'air pour une combustion complète. Cette quantité excessive d'air entraîne à son tour, une augmentation de la température des gaz de carneau puisque la vitesse accrue des gaz les empêche de libérer une grande partie de leur chaleur en passant trop rapidement sur les surfaces du dispositif de transfert thermique. Ces

modifications, s'accompagnent d'une réduction du débit de vapeur ou de fluide caloporteur fourni par le système.

Un bilan précis du rendement d'une chaudière exige une connaissance détaillée de la composition des combustibles, des conditions atmosphériques, des pertes par rayonnement par les parois externes de la chaudière et d'autres données difficiles à obtenir pour une installation industrielle moyenne. Les débits, les températures et les pressions du combustible, de la vapeur, des gaz de carneau, de l'air comburant, de l'eau d'alimentation et ainsi que les caractéristiques de la purge peuvent être mesurés et un bilan énergétique global peut être établi afin de déterminer directement le rendement de la chaudière. Cependant, si l'on accepte certaines valeurs-types concernant les propriétés du combustible et de l'air, il est facile de faire une évaluation assez précise au moyen d'un minimum de mesures. Il s'agit simplement d'utiliser la "méthode Btu" pour l'analyse de la combustion. Avec cette méthode, toutes les quantités sont associées à une capacité calorifique de 10 000 Btu dans le rapport de combustible. Les propriétés du mazout lourd typique (environ un numéro 4) et du gaz naturel type sont utilisées dans ces calculs.

Le tableau de la page suivante démontre toutes les étapes de la procédure. L'étape 1 indique les deux apports nécessaires: le pourcentage d'excès d'air et la température de sortie des gaz de carneau. Ces valeurs sont déterminées à partir de mesures décrites plus loin. Dans les étapes 2 à 7, les quantités de combustible, d'air et d'humidité associées à 10 000 Btu d'apport calorifique sont calculées. Ces quantités servent à déterminer les différentes pertes de chaleur, attribuables aux gaz de carneau des étapes 8 à 10. Les pertes diverses et le rendement de la chaudière sont déterminés aux étapes 11 et 12.

Calcul du rendement d'une chaudière

La méthode indirecte, appelée "méthode de la perte de chaleur", est en général le moyen le plus rapide et le plus précis pour établir le rendement d'une chaudière. Cinq mesures ou apports sont nécessaires: le niveau de CO_2 ou de O_2 (excès d'air), la température des gaz brûlés, la température de l'air comburant et les sorties réelles et nominales de la chaudière. Il se produit deux pertes distinctes: la première, les pertes du gaz de carneau sec, représente la chaleur sensible dans les gaz perdus par la cheminée. La seconde, la perte d'hydrogène, est due à l'humidité des gaz de carneau formés par la combustion de l'hydrogène du combustible. Les pertes en gaz de carneau secs dépendent de l'excès d'air et de la différence de température entre les gaz de carneau et l'air comburant. Pour un combustible donné, la perte d'hydrogène dépend uniquement de la température des gaz brûlés et de la température de l'air comburant.

Afin de faciliter ces calculs, une illustration graphique des deux pertes de chaleur est présentée dans l'appendice de la présente brochure, en fonction de trois combustibles-types: le mazout n° 6, le mazout n° 2 et le gaz naturel. L'autre graphique général placé à la page suivante permet de déterminer la perte par rayonnement de presque tous les modèles de chaudières. Pour un calcul plus détaillé du rendement d'une chaudière, voyez le *ASME Power Test Code for steam generating units.*

Les mesures — élément essentiel

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, certaines mesures sont nécessaires pour vérifier le rendement d'une chaudière.

La première de ces mesures est la température des gaz brûlés. Bien que n'étant pas suffisante par elle-même pour calculer le rendement d'une chaudière, elle en fournit un indice constamment mis à jour. Les défectuosités importantes se répercuteront presque toujours instantanément sur la température des gaz brûlés. Lorsque la cheminée est accessible et visible de la zone d'exploitation, le moyen le plus simple de mesurer la température des gaz brûlés c'est de se servir d'un thermomètre à cadran. Il s'agit d'instruments solides et sûrs qui peuvent être installés de façon permanente directement dans la cheminée. Il faut cependant user de prudence lorsqu'on se sert de la température indiquée pour établir le rendement de la chaudière puisqu'il peut y avoir des fluctuations importantes de la température des gaz brûlés et, dans certains cas, le thermomètre peut être sujet à d'importantes erreurs dues au rayonnement. Il faut utiliser un thermomètre dont l'élément est assez long pour être en grande partie environné par le courant de gaz.

On peut obtenir un relevé continu de la température de cheminée à l'aide d'un thermocouple (ou autre élément sensible) et d'un enregistreur électronique. On peut aussi utiliser des enregistreurs à thermomètre mécanique. Il faut prendre les mêmes précautions mentionnées plus tôt relativement aux thermomètres à cadran lors de l'installation de ces dispositifs.

On peut obtenir une mesure globale du rendement d'une chaudière en mesurant directement ou indirectement le débit du combustible et de la vapeur. On peut installer directement de simples débitmètres à diaphragmes dans les conduites de gaz naturel ou de vapeur et mesurer le débit total sur une période de temps donnée. Si l'on connait les conditions de la vapeur et le pouvoir calorifique du combustible, il est facile de calculer le rendement de la chaudière.

On peut obtenir des mesures similaires, de façon indirecte, à l'aide d'un compteur de type spécial qui mesure le débit de vapeur à l'aide d'un diaphragme placé dans la conduite de vapeur tandis que le débit de combustible est déduit de la chute de pression des gaz de carneau à leur passage dans la chaudière. Pour interpréter ces relevés, il faut calibrer la chaudière une fois le compteur en place.

Huit étapes pour déterminer le rendement de votre chaudière

1. Déterminer l'excès d'air à partir de la mesure de l'O_2 ou du CO_2.
2. Déterminer la différence entre la température des gaz brûlés et la température de l'air comburant (ΔT).
3. Déterminer la perte de chaleur sensible (toutes pertes de gaz de carneau) à l'aide des graphiques de l'appendice de la présente brochure. (À l'intersection de la courbe ΔT et de celle du niveau d'excès d'air).
4. Déterminer les pertes dues à la présence d'hydrogène dans le combustible à l'aide des diagrammes de l'appendice (à l'intersection des courbes de la température des gaz brûlés et de la température de l'air comburant).
5. Déterminer les pertes par rayonnement du casing de la chaudière à l'aide du graphique ABMA de l'appendice, en suivant la courbe de la charge nominale de la chaudière jusqu'à son point de rencontre avec la courbe de la charge de fonctionnement, puis le long de l'axe vertical et vers le bas pour les écrans d'eau.
6. Ajouter une évaluation pour les pertes non mesurées — 0,25 pour le gaz naturel, 0,50 pour le mazout et 1,0 pour le charbon.
7. Additionner les pertes 3→6.
8. Rendement de la chaudière — (100 — pertes) %.

Exemple de calcul pour déterminer le rendement d'une chaudière

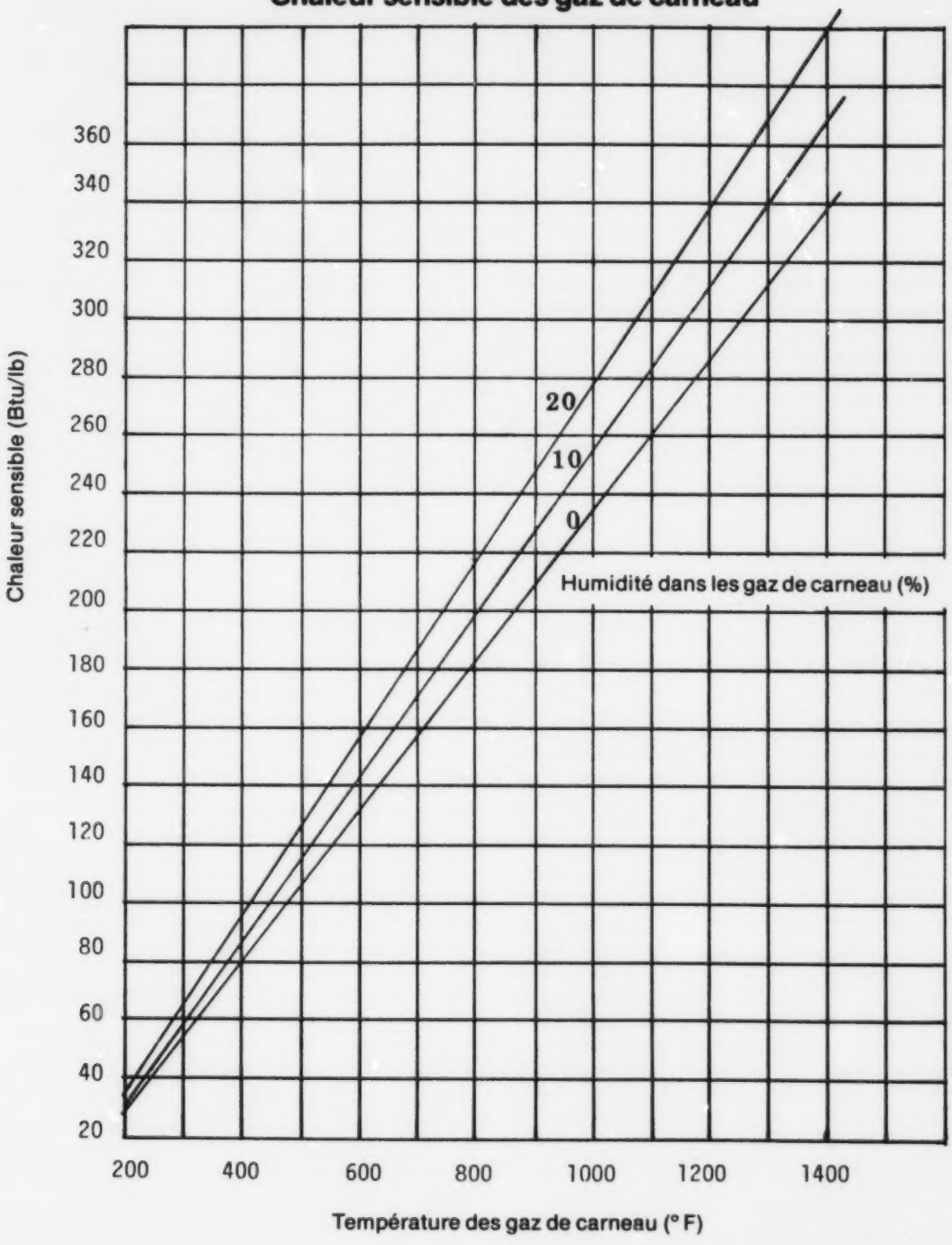
La situation: une chaudière à quatre écrans d'eau dont la charge nominale est de 30 000 livres de vapeur/h consomme du mazout n° 2 ou n° 6 ou du gaz naturel. Au tiers de la charge (10 000 lb), on a pris les mesures suivantes pour chacun des combustibles:

Combustible	Températures des gaz brûlés °F	Température de l'air comburant °F	O_2 (%)
Mazout n° 2	600	100	7
Mazout n° 6	600	100	7
Gaz naturel	550	100	7

Calcul du rendement	n° 2	n° 6	gaz naturel
1. Excès d'air (¢)	45	45	45
2. Différence de température entre les gaz brûles et l'air comburant (° F)	500	500	450
3. Pertes de gaz de combustion secs (perte de chaleur sensible) (%)	13	13.2	11
4. Pertes d'hydrogène (%)	6.7	6.9	11.6
5. Pertes par rayonnement (%)	2.6	2.6	2.6
6. Pertes non mesurées (%)	.5	.5	.25
7. Pertes totales (%)	22.8	23.2	25.5
8. Rendement (%)	77.2	76.8	74.5

FIGURE 10

Chaleur sensible des gaz de carneau



Une fois cela fait, on peut se servir du compteur pour régler continuellement les débits de vapeur et d'air selon le rapport que des essais préalables auront permis d'estimer le plus apte à assurer une combustion complète.

La méthode la plus précise pour déterminer le degré de combustion dans une chaudière ou un élément chauffant est sans doute la mesure directe de la composition chimique des gaz de carneau, en particulier, la quantité d'oxygène et d'éléments combustibles dans la cheminée.

Un dispositif peut coûteux mais "salissant" pour déterminer la composition du gaz, est un analyseur Orsat. On prélève dans la cheminée un échantillon

des gaz de combustion à l'aide d'un tube échantillonneur; le gaz est ensuite successivement passé par une série de pipettes, chacune contenant une solution chimique différente. Chacune de ces solutions absorbe sélectivement l'un des éléments du gaz de combustion, comme l'oxygène, l'oxyde de carbone ou le gaz carbonique. La réduction volumique de l'échantillon chaque fois qu'un des éléments du gaz est absorbé indique la quantité de cet élément qui était présente dans l'échantillon. Ces quantités connues, le pourcentage d'excès d'air utilisé pour la combustion peut être calculé.

Les analyseurs Orsat sont peut coûteux, suffisamment précis pour des tests opérationnels courants et présentent très peu de problèmes. Les préposés à l'entretien peuvent facilement apprendre à les utiliser. Il faut cependant acheter ou préparer de nouveaux réactifs toutes les quelques semaines et certains calculs sont nécessaires pour convertir les relevés. D'autres dispositifs sur le marché donnent également des relevés assez précis.

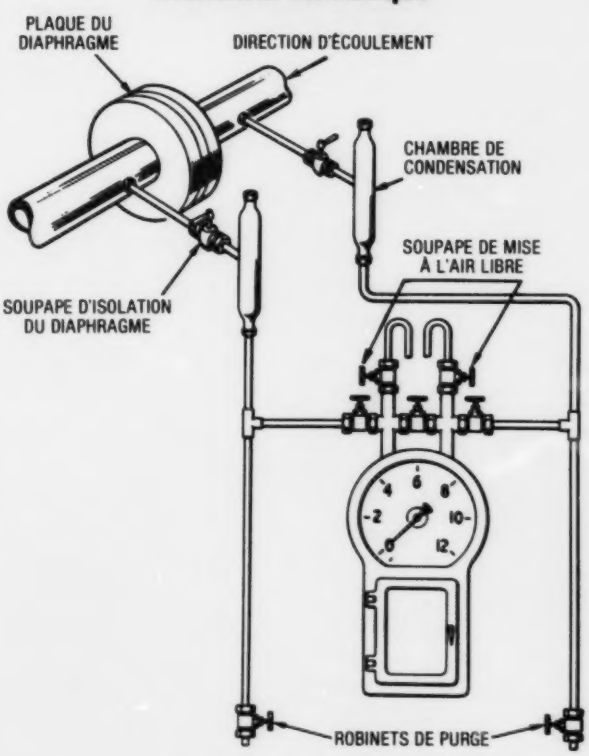
Les analyseurs de combustion manuels sont d'un usage plus facile et plus rapide et fournissent une lecture directe du pourcentage d'oxygène ou du gaz carbonique dans l'échantillon de gaz de carneau. Des échantillons sont continuellement prélevés à l'aide d'une petite pompe placée dans le boitier de l'analyseur et sont passés dans un filtre pour les débarrasser de la suie et d'autres particules et dans un filtre d'eau.

Les analyseurs d'oxygène les plus efficaces sont du type paramagnétiques ou du type à oxyde de zirconium. Cependant, une mesure tout aussi précise peut être faite à l'aide d'un analyseur infrarouge au gaz carbonique pourvu que l'on connaisse la composition du combustible ou que celle-ci soit relativement constante. Un analyseur de combustion portatif est peut-être coûteux mais son acquisition peut être rentable.

Dans les grandes installations, il peut être bon de tenir en permanence un relevé (ou d'avoir au moins toujours une indication) de la quantité d'oxygène et de combustibles dans les gaz de carneau. Les dispositifs permettant un contrôle continu des éléments des gaz brûlés coûtent généralement plusieurs milliers de dollars mais se paient souvent par eux-mêmes en très peu de temps lorsqu'ils sont utilisés pour le contrôle permanent de la combustion dans le système. Si plusieurs chaudières ou dispositifs de chauffage fonctionnent simultanément, il est possible d'utiliser un système multi-points qui prélève des échantillons de gaz selon une séquence établie à plusieurs points éloignés. En partageant l'usage des détecteurs coûteux et de l'équipement électronique entre plusieurs chaudières, on en réduit considérablement le coût par chaudière.

Un programme régulier de contrôle des gaz de carneau est un élément vital à l'amélioration du rendement des chaudières et des dispositifs de chauffage. Les dispositifs décrits ci-dessus, s'ils

FIGURE 11
Débitmètre à diaphragme et indicateur mécanique



sont utilisés judicieusement, peuvent fournir les informations nécessaires pour régler les clapets d'admission d'air de façon à assurer une combustion efficace. Il va de soi qu'une évaluation et un nettoyage corrects des conduites et des filtres d'échantillonnage sont essentiels pour assurer la validité des lectures. Comme nous le verrons plus tard, les systèmes de contrôle continu des gaz brûlés sont également des éléments importants dans certains systèmes de contrôle automatique des chaudières.

Il existe plusieurs moyens d'améliorer le rendement d'une chaudière en réalisant souvent des économies substantielles: amélioration de l'entretien et du fonctionnement de la chaudière perfectionnement des contrôles, installation de nouveaux brûleurs, plus grand soin apporté à l'installation de la chaudière et pose d'un équipement de récupération de la chaleur perdue.

Entretien et fonctionnement

La clé de toute amélioration au fonctionnement et à l'entretien d'une chaudière est l'évaluation régulière du rendement de la chaudière à l'aide de la méthode de la perte de chaleur décrite ci-dessus. Si l'on utilise plusieurs chaudières en série, il est évident qu'il faut d'abord fixer l'ordre d'utilisation de chaque chaudière selon un ordre de rendement

décroissant; ainsi, à charge réduite, seule la chaudière la plus efficace sera utilisée, les autres étant gardées en réserve et successivement mises en marche selon les besoins. Les chaudières étant généralement conçues pour un rendement maximum à pleine charge, on obtiendra un rendement global optimal en utilisant deux chaudières fonctionnant à pleine capacité plutôt que trois qui fonctionneraient à charge partielle.

La propreté des surfaces des échangeurs de chaleur est un facteur important pour tirer un rendement maximal des chaudières. L'accumulation de tartre du côté eau des tubes des chaudières et le dépôt de suie et de cendres côté gaz des tubes augmentent la résistance à l'échange de chaleur entre le gaz et l'eau. Cette résistance additionnelle se traduit par une augmentation de la température des gaz brûlés et de la consommation de combustible pour produire une quantité de vapeur donnée.

L'entartrage côté eau résulte de la précipitation de minéraux, particulièrement des sels de fer et du silice, à haute température. Ce genre de problème est parfois très coûteux; par exemple, une couche de tartre d'un trente-deuxième de pouce à forte teneur en fer et en silice, peut réduire le rendement d'une chaudière de 5 à 7 p. 100. Il peut s'ensuivre une augmentation annuelle de plusieurs milliers de dollars de la consommation de combustible. Un traitement approprié de l'eau d'alimentation peut éliminer le problème. Il faut s'assurer les services d'un spécialiste qui procédera à une analyse de la composition chimique de l'eau d'alimentation de la chaudière avant de recommander les dispositifs nécessaires pour corriger la situation. Les tubes peuvent aussi être nettoyés mécaniquement à condition que cela soit fait régulièrement. Mais il s'agit d'une méthode qui peut coûter très cher parce qu'elle oblige chaque fois à mettre la chaudière hors service.

Les dépôts côté gaz des tubes représentent un problème sérieux dans les appareils au mazout et il faut en tenir compte, même pour les chaudières à gaz "deux carburants" Le rendement d'une chaudière chauffée temporairement au mazout peut se dégrader sérieusement en peu de temps puisque les surfaces d'échange de chaleur ne sont pas spécialement conçues pour le fonctionnement avec un combustible fuligineux. On peut nettoyer à la main les dépôts de suie mais si le mazout est utilisé sur une base régulière, il vaut mieux installer des souffleurs de suie dans la chaudière. Ces dispositifs arrosent périodiquement de jet d'air comprimé ou de vapeur les surfaces des tubes pour déloger les dépôts de suie.

À titre d'exemple des gains réalisables avec des souffleurs de suie, une compagnie a installé des souffleurs dans ses deux chaudières à tubes de fumée, de 400 et 500 chevaux-vapeurs respectivement. Les souffleurs ont permis une réduction nette de 7 p. 100 de la consommation de mazout n° 6. Comme le combustible coûtait $0.35 le gallon américain, la compagnie a récupéré son investissement en environ 14 mois.

Amélioration du contrôle des chaudières

Comme nous l'avons vu dans un chapitre précédent, un bon contrôle de combustion consiste à trouver un compromis satisfaisant entre l'insuffisance et l'excès d'air comburant. La plupart des petites chaudières sont généralement munies d'un simple dispositif de contrôle mécanique communément appelé contrôleur à arbre intermédiaire. Il s'agit d'un dispositif où la pression de la vapeur est le signal de contrôle de base. Ce signal agit sur une timonerie mécanique reliée à la soupape du combustible et au clapet d'admission d'air comburant. On peut régler dans certaines limites le mouvement relatif de ces deux éléments à l'aide de cames spéciales mais la présence de la timonerie mécanique empêche de régler manuellement sur une base régulière les débits relatifs d'air et de combustible. Le système à arbre intermédiaire est habituellement réglé pour des conditions données lors de l'installation de la chaudière neuve et les ajustements subséquents sont rates: comme le dispositif doit s'adapter à des fluctuations du pouvoir calorifique du combustible et des conditions de l'air, il est toujours réglé de manière à fournir un excès d'air considérable afin de pouvoir assurer la combustion complète de tous les combustibles, même ceux qui exigent la plus forte proportion d'air comburant. Généralement, pour une chaudière à gaz, le dispositif est réglé pour fournir de 30 à 40 p. 100 d'excès d'air.

Un perfectionnement de ce dispositif de base est constitué par ce qu'on appelle le dispositif de contrôle à position parallèle. Il s'agit encore une fois d'un appareil où la pression de la vapeur est le signal d'entraînement mais la timonerie mécanique y est remplacée par des drivers parallèles pneumatiques ou électroniques. Ces drivers actionnent les commandes d'admission de combustible et d'air selon un pattern pré-établi. Avec ce type de dispositif, l'intervention de l'opérateur est habituellement nécessaire. Si certains moyens d'analyser les gaz de carneau sont aussi prévus, il est ordinairement possible d'améliorer le rendement par rapport au dispositif à arbre intermédiaire.

Le troisième dispositif de contrôle, beaucoup plus complexe, est connu sous le nom "d'équilibre de pression". Dans ce système, la pression du combustible au brûleur et la chute de pression des gaz de carneau dans la chambre de combustion sont directement détectés et le dispositif est conçu de manière à équilibrer ces pressions. L'aptitude de ce dispositif à assurer une bonne régulation de la combustion repose sur l'hypothèse que les débits de combustible et d'air sont directement reliés aux pressions. Bien que cela soit vrai en partie, les débits dépendent aussi de certaines autres variables comme la température du combustible et de l'air. De plus, comme le pouvoir calorifique du

combustible peut varier légèrement, le débit massique indiqué par la pression au brûleur n'est pas un indicateur tout-à-fait précis de la quantité d'air nécessaire pour une combustion complète. Bien que ce dispositif se rapproche davantage d'un véritable système de contrôle du combustible et de l'air, il faut encore prévoir une marge de sécurité. C'est le dispositif le plus fréquemment utilisé dans les grandes usines.

Le plus complexe des principaux dispositifs généralement disponibles fait intervenir la mesure directe des débits de combustible et d'air grâce à des débitmètres installés dans les circuits de combustible et d'air. Les signaux produits par les débits de combustible et d'air sont acheminés vers un dispositif électronique qui commande la soupape de combustible et les clapets d'admission d'air selon le programme établi. Parmi les perfectionnements apportés à ce dispositif, on peut citer la limitation mixte qui empêche les débits de combustible et d'air de dépasser des proportions pré-établies l'un par rapport à l'autre, ainsi que la rétroalimentation en oxygène par laquelle un détecteur d'oxygène installé dans la cheminée envoie un signal de contrôle additionnel à un dispositif électronique inclus dans les contrôles.

Le graphique indique une réduction type de la quantité d'excès d'air qui peut être obtenue à l'aide des différents systèmes de contrôle décrits ci-dessus. Le tableau indique également le coût d'installation de ces systèmes de contrôle tel qu'évalué par un fabricant en 1974. Bien que ces coûts soient exprimés en dollars américains et qu'il faille les majorer légèrement pour la conjoncture actuelle, ils fournissent une échelle de grandeur relativement précise. Les graphiques à l'appendice de la présente brochure peuvent servir à évaluer les économies réalisables grâce à une réduction de l'excès d'air à 10 p. 100 pour le gaz naturel et à 20 p. 100 pour le mazout n^{o} 6.

En ce qui concerne le gaz naturel, supposons que le système en place fonctionne avec 40 p. 100 d'excès d'air et une température de cheminée de 316° C. La température de l'air comburant est de 25° C. La perte de chaleur, indiquée au point d'intersection des courbes de l'excès d'air de 40 p. 100 et de la différentielle de température de 274° C, est de 12.4 p. 100. Si l'excès d'air est abaissé à 10 p. 100, la perte de chaleur tombe à 9.5 p. 100. L'amélioration du rendement est de 2.9 p. 100, ce qui correspond à une économie de combustible de près de 4 p. 100.

De même pour le mazout, avec des conditions similaires de température (mais un excès d'air initial de 60 p. 100), la perte de chaleur est de 15.2 p. 100. À 20 p. 100 d'excès d'air, elle tombe à 11.4 p. 100. Cela équivaut à un gain de rendement de 3.8 p. 100 et à une économie de combustible de 5 p. 100.

D'après ces données, on peut voir que l'investissement nécessaire à l'installation de contrôles sur les chaudières peut être récupéré en une année ou deux. En fait, la réduction de l'excès d'air abaisse également la température des gaz brûlés, ce qui est une autre source d'économie.

Équipement de récupération de la chaleur

Une fois atteint une combustion adéquate dans la chaudière ou les dispositifs de chauffage, on peut obtenir d'autres améliorations de rendement en éliminant certaines pertes inhérentes à la conception de base de l'équipement. Certaines vieilles unités sont mal calorifugées, particulièrement aux plaques de tête et aux portes d'accès. Il s'agit d'un défaut relativement simple et peu coûteux à corriger mais dont l'élimination peut réduire sensiblement la consommation de combustible.

Une autre mesure possible avec les vieilles chaudières à tubes de fumée où la température de gaz brûlés est très élevée, c'est d'installer un stimulateur de turbulence pour activer l'échange de chaleur dans les tubes. Il s'agit de simples bandes métalliques à point de fusion élevé qui sont insérées dans chaque tube afin de créer des tourbillons et de la turbulence dans les gaz chauds en circulation. Ces dispositifs coûtent très peu par tube; leur installation peut améliorer notablement le rendement de la chaudière.

En plus de ces petites modifications, des améliorations substantielles du rendement peuvent être obtenues grâce à l'installation de surfaces de récupération de la chaleur sur le trajet des gaz brûlés. Nous avons abordé le sujet dans le chapitre intitulé "Fours et fourneaux" de la présente brochure ainsi que dans celle intitulée "Calcul Fondamental et Récupération de la chaleur" (Voir l'index du document 1).

Au cours des dernières années, le prix raisonnable du combustible ne justifiait pas l'installation dans les chaudières de surface d'échange de la chaleur suffisantes pour abaisser la température des gaz brûlés en-dessous de 260° C ou 316° C. Mais aux prix actuels, l'investissement nécessaire pour ajouter des surfaces de récupération de la chaleur peut généralement être récupéré sur une période d'un ou deux ans, grâce aux économies de combustibles qu'il permet. La chaleur récupérée peut être utilisée de plusieurs manières, ce qui dépend de la température maximale que peuvent fournir les gaz de carneau.

Lorsque la température des gaz brûlés dépasse de plusieurs centaines de degrés la température de vapeur nécessaire, il peut être possible de produire de la vapeur additionnelle dans une chaudière de récupération en utilisant soit une circulation naturelle ou forcée. Quand la température de cheminée est légèrement plus basse, un économiseur peut servir à amener l'eau d'alimentation près du point d'ébullition avant qu'elle n'arrive dans la chaudière.

On peut également chauffer d'autres liquides caloporteurs dans une unité de récupération de la chaleur au lieu de l'eau de chaudière elle-même ou

en plus de celle-ci. Par exemple, il peut être rentable de remplacer les conduites de traçage à la vapeur, des tuyaux ou des citernes par des conduites utilisant un liquide caloporteur organique chauffé dans une unité de récupération de la chaleur. D'autres substances utilisées dans le procédé, comme les matières premières, peuvent également être réchauffées afin de réduire l'énergie combustible nécessaire pour les amener à la température de traitement nécessaire. Après réduction de la température des gaz de carneau à environ 10° C de la température d'arrivée de l'eau d'alimentation, ceux-ci peuvent être utilisés pour réchauffer l'air comburant avant son entrée dans la chambre de combustion.

Règle générale, la plus basse température d'utilisation pratique des gaz de carneau est d'environ 94° C pour l'équipement au gaz naturel et de 149 à 176° C pour les chaudières à mazout. Ces dernières sont limitées par la nécessité d'éviter la condensation de vapeur d'acide sulfurique dans les gaz brûlés des combustibles à base de soufre.

Le document intitulé "Calcul fondamental" traite en détail des différents dispositifs de récupération de la chaleur sur le marché; mais à titre d'exemple de l'amélioration de rendement possible grâce à une chaudière de récupération, prenons le cas d'une petite chaudière de 500 HP fonctionnant à une température des gaz brûlés de 334° C. L'eau d'alimentation de la chaudière arrive à 100° C. L'utilisation d'un économiseur pour réchauffer l'eau à 149° C semble la meilleure solution. D'autre part, l'économiseur à tube à ailettes nécéssaire à cette fin coûte environ $8 000 à la fabrication et environ $12 000 une fois installé. L'appareil récupère environ 1,5 MMBtu/h, ce qui, si le combustible coûte $2 par millier de pieds cubes, représente une économie d'environ $3 l'heure de fonctionnement. L'investissement peut donc être normalement récupéré en moins de trois ans.

Comparaison d'économies de combustible des systèmes de contrôle de combustion des chaudières

Type de système	Arrivée en milliers de Btu/h	Coûts d'installation 1974, en dollars	Économies totales en dollars/an	
			$1.00/MBtu	$2.00/MBtu
a) Arbre intermédiaire	10,000	18,000	0	0
	25,000	18,500	0	0
	50,000	19,000	0	0
b) Parallèle (réglage par l'opérateur)	10,000	20,000	800	1,600
	25,000	20,500	2,000	4,000
	50,000	21,000	4,000	8,000
c) Equilibre de pression	10,000	23,600	1,600	3,200
	25,000	24,100	4,500	9,000
	50,000	24,600	9,000	18,000
d) Mesure (limitation mixte)	10,000	28,600	3,500	7,000
	25,000	29,100	8,750	17,500
	50,000	29,600	17,500	35,000
e) Mesure (limitation mixte avec correction de 1'0_2)	10,000	34,100	4,100	8,200
	25,000	34,600	10,250	20,500
	50,000	35,100	20,500	41,000

1. Pourcentage d'économie de combustible possible (Température des gaz de carneau de 600° F)
   a) arbre intermédiaire — 0% (Base)
   b) position parallèle —1.0%
   c) équilibre de pression —2.0%
   d) Mesure avec limitation mixte —4.3%
   e) Mesure avec limitation mixte et rétro-alimentation en O_2 —5.1%
2. Coûts d'installation comparés aux économies de combustible annuelles en dollars (8000 h fonctionnement par année) Coûts de combustible $1/millier Btu et $2/millier Btu

Les préchauffeurs d'air étant coûteux, il faut plus de temps pour récupérer l'investissement; cependant, l'augmentation continuelle du prix de combustible les rend quand même très intéressants.

On peut récupérer économiquement d'importantes quantités de chaleur provenant de l'eau de purge d'une chaudière en la soumettant au flashing afin de produire une vapeur à basse pression ou en se servant d'un échangeur de chaleur relié au canal de purge afin de chauffer l'eau d'appoint qui arrive. Dans les opérations qui nécessitent une purge considérable à cause des fortes quantités de solides dissous, la récupération de la chaleur provenant du système peut représenter plusieurs pourcents de l'apport énergétique à la chaudière. (Voir aussi le fascicule intitulé "Utilisation rationnelle de la vapeur".

La plupart des chaudières et des dispositifs de chauffage utilisés de nos jours ont été conçus dans le but de réaliser sans trop de frais des économies de combustible. Avec l'évolution récente de la conjoncture énergétique, les impératifs techniques et économiques ont été radicalement changés. Il est désormais très important de reconsidérer l'exploitation des chaudières ainsi que les investissements visants à améliorer leur rendement et nul doute que cette tendance ira en s'accentuant au cours des années.

Matériaux résiduaires utilisés comme combustible

Bien que l'on ait accompli d'important progrès au cours de la dernière décennie en matière d'incinération des déchets municipaux pour produire de l'énergie, l'incinération industrielle des déchets demeure largement sous-développée.

Cela s'explique essentiellement par deux raisons:

1. Le combustible était bon marché et il était peu intéressant de récupérer la chaleur des incinérateurs et sans récupération de la chaleur; il était plus économique de transporter les résidus par camions jusqu'à des dépotoirs à ciel ouvert.
2. Certains incinérateurs présentaient des problèmes de pollution par échappement excessif de particules. L'addition de nouveaux contrôles auxiliaires des émissions rendait l'incinération économiquement beaucoup moins intéressante.

De toute évidence, l'un de ces facteurs a considérablement évolué. Le prix du combustible n'est pas seulement plus élevé, il continue constamment de grimper. Cela a entraîné un essor considérable des techniques d'incinération et de récupération de la chaleur connexes. Les incinérateurs à pyrolyse, à lit fluidisé et d'autres peuvent économiquement convertir une grande quantité de déchets industriels solides, liquides et gazeux en une chaleur récupérable et fréquemment produire, avec ou sans l'aide d'un équipement antipolluant, un effluent propre composé de gaz carbonique et de vapeurs d'eau.

Ces incinérateurs sont en vente chez plusieurs fabricants dans des dimensions qui conviennent à de nombreuses usines de catégorie autre que la General Motors. Ils peuvent servir à produire de la vapeur dans une chaudière distincte ou à chauffer l'air destiné à divers procédés industriels à l'aide d'un échangeur thermique. Vous trouverez des études de cas concernant des incinérateurs industriels dans un chapitre subséquent du présent document.

Comment fonctionne un incinérateur à pyrolyse

Les incinérateurs à pyrolyse transforment les déchets en chaleur récupérable en deux étapes. La première prend place dans la chambre de combustion principale de l'incinérateur où se déroulent les opérations suivantes:

- un pourcentage limité des déchets est décomposé thermiquement afin de produire de la chaleur
- une portion des déchets est gazéifiée pour usage ultérieur comme combustible dans un réacteur thermique secondaire
- les résidus riches en carbone sont brûlés dans le foyer

Environ le tiers de la quantité totale d'air nécessaire à la combustion est introduite par de nombreuses petites ouvertures dans le four de la principale chambre de combustion. La combustion rapide se produit dans les zones isolées près de ces offices et les produits de la combustion sont rejetés à de très hautes températures. Ils sont filtrés vers le haut au travers de la masse de déchets se trouvant dans la chambre principale, élevant ainsi la température de ces déchets et entraînant leur gazéification. Les réactions qui se produisent sont complexes, faisant intervenir des oxydations et des réductions.

Au fur et à mesure que la réaction se poursuit, la garniture réfractaire de la principale chambre est chauffée, irradiant de la chaleur dans les déchets et produisant un effet de ventilation thermique à mesure que les déchets sont placés par intermittence dans la chambre principale. La haute température qui en résulte entraîne l'élimination des produits volatiles de déchets par gazéification. Aucun oxygène n'étant disponible pour la combustion, les gaz sont surtout de l'oxyde de carbone et des hydrocarbures. Enfin, les résidus riches en carbone provenant de la dégazéification sont brûlés dans le foyer.

La deuxième étape se produit dans le réacteur thermique ou dans la section du brûleur d'appoint à faible énergie. La combustion est complétée en introduisant de l'air frais préchauffé et en mettant à feu le mélange gazeux à l'aide d'une veilleuse. La température des gaz provenant de la chambre

principale étant supérieure à 614° C au moment où ils pénètrent dans le brûleur d'appoint, la veilleuse n'élève pas la température globale. Cependant, au moment où les gaz sont enflammés, les températures atteignent 1134° C. De l'air additionnel est alors aspiré naturellement par une série de sections jusqu'à ce qu'au moins 150 p. 100 de l'air nécessaire soit présent, assurant ainsi une combustion complète.

Une limitation efficace de l'arrivée d'air dans la chambre principale réduit la turbulence résultante et, de ce fait, la quantité de particules produites et entraînées dans les gaz de carneau. De plus, les hautes pressions généralement observées dans les incinérateurs à pyrolyse conventionnels sont éliminées et la chambre de combustion principale fonctionne à pression négative. La combustion complète est particulièrement importante dans la récupération des chaleurs puisque tous les dispositifs auxiliaires d'échange thermique ne sont pas soumis à une forte concentration de particules.

Récupération de la chaleur

Si on admet le principe qu'il est possible de contrôler la décomposition thermique d'une matière organique, il est relativement simple, du point de vue d'un ingénieur, de munir un incinérateur des échangeurs de chaleur appropriés. La récupération de la chaleur des gaz de carneau n'est restreinte que par les limitations de l'échangeur de chaleur. Plusieurs modèles commerciaux d'équipement de récupération de la chaleur des gaz de carneau peuvent fonctionner efficacement dans les incinérateurs industriels modernes. Un type d'échangeur polyvalent est l'échangeur tubulaire. Des faisceaux de tubes peuvent être installées, entraînant un échange thermique élevé. Un médium chaud peut circuler à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes, le choix dépendant surtout des impératifs d'entretien pour assurer l'efficacité de fonctionnement. Un assez grand choix de matériaux est disponible pour les tubes qui fonctionnent normalement à une température à peu près égale à la moyenne de la température des gaz de carneau et de celle de l'air ambiant ou environ 382° C.

L'échangeur thermique à faisceau de tubes placé sur la cheminée de l'incinérateur est une installation-type. Dans ce cas, le flux des gaz de carneau chauds passe à l'intérieur du faisceau de tubes alors que l'air de l'usine passe à l'extérieur des tubes. On contrôle la température de l'air chaud résultant en réglant le débit d'air dans l'échangeur. L'air chauffé peut servir à la climatisation ou à d'autres fins.

Production de vapeur

En utilisant les gaz dans la production de la vapeur, on recommande une chaudière préassemblée. Les chaudières étant normalement de même dimension et de même poids que l'incinérateur, le montage dans la cheminée est impossible. La chaudière est reliée à l'incinérateur par des sections de canalisations réfractaires et peut être allumée par l'incinérateur seul ou par l'incinérateur et un brûleur auxiliaire. Ce type de récupération de la chaleur est extrêmement intéressant lorsque l'usine utilise soit de la vapeur à haute ou à basse pression pour ses opérations de fabrication ou pour chauffer l'édifice. La sortie de la chaudière est reliée à un collecteur de vapeur classique et à l'alimentation principale en vapeur de l'usine. Lorsque l'incinérateur fonctionne, la chaudière de récupération sert de système principal appuyée par des chaudières classiques qui entrent en action quand les besoins excèdent sa capacité d'alimentation.

L'incinération est-elle plus économique que le transport par camion?

À une époque où les besoins énergétiques croissent sans cesse et où les réserves de combustible diminuent constamment, la production sur place d'énergie à partir des déchets peut offrir d'importants avantages économiques pour les grandes usines.

Pour déterminer si la transformation des déchets d'une usine en énergie est rentable, il faut procéder à une étude des déchets solides et des besoins en énergie. Les données à obtenir sont les suivantes:

1. le genre de déchets solides produits,
2. le volume quotidien de déchets produits,
3. la densité (en livre par verge cube) de chaque type de déchets,
4. le poids total des déchets produits par jour,
5. la valeur en Btu par livre de déchets,
6. la sortie totale quotidienne en Btu pour chaque type de résidus.

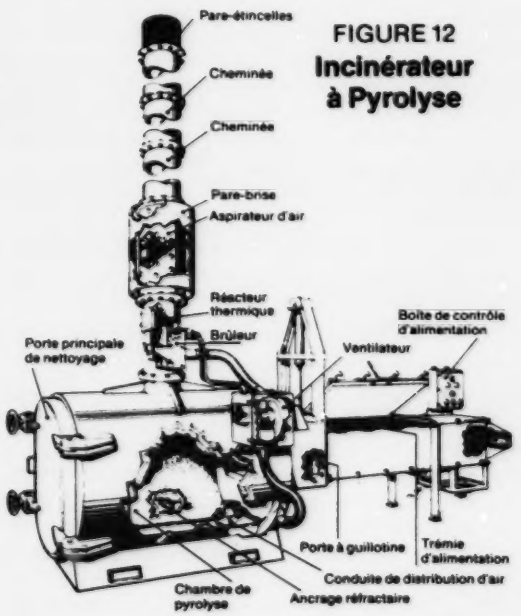


FIGURE 12
Incinérateur à Pyrolyse

En divisant le poids total de déchets produits chaque jour par les heures d'incinération disponibles (établies par l'ingénieur de l'usine) on obtient le taux de combustion nécessaire en livres à l'heure. La valeur moyenne en Btu par livre est calculée en divisant la valeur totale quotidienne en Btu par le nombre de livres total par jour. On peut alors déterminer la capacité exacte d'un incinérateur à pyrolyse.

Après avoir déterminé les frais d'équipement et les coûts d'installation de l'équipement, il est simple de les comparer aux dépenses actuelles de l'usine pour transporter les déchets à un dépotoir ou un site de remplissage.

Les résultats de l'étude peuvent alors être utilisés pour calculer les économies de combustible que pourrait permettre la récupération de la chaleur perdue. Il faut cependant user de prudence. Dans bien des cas, la collecte et l'évaluation des données de telles études exigent une connaissance spécialisée des procédures de manutention des déchets, de l'évaluation des coûts en combustible. À défaut de spécialistes dans le personnel de l'usine, il peut être sage d'avoir recours à des experts de l'extérieur, qu'il s'agisse de consultants, de fabricants d'incinérateurs ou de leur représentants régionaux.

Applications-types

Les installations suivantes sont des exemples d'utilisation courante dans l'industrie d'incinérateurs munis d'équipement de récupération auxiliaire de l'énergie. (Voir aussi: "Études de cas").

- Une fabrique de ciment brûle de l'huile à moteur usagée pour fournir la vapeur utilisée dans les fours à ciment. Le ciment neutralise les acides dans les gaz de carneau, à l'aide de précipitateurs électrostatiques dans la cheminée qui éliminent les particules résiduelles.
- Une scierie canadienne brûle ses rebuts de bois pour produire économiquement la vapeur utilisée dans les fours à bois. Le propriétaire prétend que l'escalade soutenue du prix des autres combustibles l'auraient autrement forcé à fermer son usine.
- La leçon? Si vous avez d'importantes quantités de déchets combustibles quelconques, étudiez au moins la possibilité de les incinérer afin d'économiser de l'énergie et de l'argent.

ÉTUDES DE CAS

La combustion de déchets chauffe un séchoir

La situation: dans une usine américaine de la John Deere Limited, la direction se préoccupe des $40 000 qu'il en coûte chaque année pour transporter les déchets de l'usine jusqu'au site de remplissage le plus près, tout en sachant bien que ces déchets ont un contenu calorifique élevé et que s'il était possible de les brûler sans causer de pollution de l'air excessive, ils fourniraient une source de chaleur précieuse pour l'un des fours de l'usine.

Mesure prise: la compagnie installe un incinérateur à pyrolyse pouvant brûler près de 20 000 livres de déchets par jour, et fonctionnant de pair avec une unité de récupération de la chaleur, fournir plus de 3,9 MMBtu à l'heure au séchoir à peinture de l'usine. Le mélange de déchets brûlés composé est de 50 p. 100 de bois, de 10 p. 100 de plastique et de 40 p. 100 de matières diverses, les déchets en matières ondulées étant mis en ballots et vendus. Dans le système à pyrolyse, le gaz combustible est généré dans la première chambre de combustion de sorte que l'incinérateur brûle sa propre fumée et ne provoque qu'une pollution atmosphérique bien inférieure aux normes admises.

Économies d'énergie: 3,9 MMBtu/h = 14 600 000 pi^3/année.

Économies d'argent: 14 600 000 pi^3/année à $2/1000 pi^3 = $29 200/année.

Économies additionnelles dues à l'élimination du transport des déchets: $38 400/année.

Coût des améliorations: pour l'incinérateur et l'unité de récupération: $110 000.

Recommandation: considérer les déchets de l'usine comme une source potentielle de chaleur. Au fur et à mesure que les coûts énergétiques augmentent de même que les coûts du transport des déchets par camion, l'incinération de ces dernières devient un investissement de plus en plus attrayant. On estime que, selon leur composition, les déchets ont souvent une valeur en énergie récupérable atteignant $10 la tonne.

La combustion des gaz perdus produit de la vapeur

La situation: une raffinerie a un sous-produit gazeux acide qui contient un pourcentage relativement élevé de sulfure d'hydrogène et qui ne pourrait donc être libéré dans l'atmosphère sans traitement. La direction saisit l'occasion d'utiliser les 39 140 lb/h de gaz de carneau comme source de chaleur.

Mesure prise: le gaz riche en H_2S est mélangé avec de l'air et brûlé à 1300° C. Aucun appoint de combustible n'est nécessaire. L'air comburant est alors refroidi à 326° C dans une chaudière de récupération où il produit 27835 lb/h de vapeur à 175 psi. En dernière étape, le gaz de carneau passe dans un convertisseur qui extrait le soufre.

Économie d'énergie et d'argent:

en ce qui concerne les gaz de combustion,
énergie
= 39 140 lb de gaz/h X 0.695 Btu/lb°C X (1300 - 326°C)
= 26,5 MMBtu/h

Avec une température de l'eau d'alimentation de 148° C, l'énergie nécessaire pour produire une livre de vapeur à 175 psi à partir d'eau à 148° C est de 933 Btu/lb (d'après le tableau) des propriétés de la vapeur).
Avec une perte de chaleur de 2 p. 100,

débit de vapeur
= 26,5 MMBtu/h x 1/933 Btu/lb x (1—02)
= 27 800 lb/h
En supposant un coût de $1,20 par mille livres de vapeur et 4 000 heures de fonctionnement par année,
Économies annuelles:
= 27 800 lb/h x $1,20/1 000 x 4 000 h/année
= $133 000 par année.

Coûts des améliorations: non disponibles

Recommandation: envisager de se servir des déchets comme source d'énergie pour fournir de la chaleur destinée à la production de vapeur, au chauffage et à d'autres fins. Ces systèmes peuvent souvent être utilisés pour éliminer les problèmes de pollution.

Le déplacement de l'orifice d'entrée d'air économise l'énergie

La situation: à l'usine de la *St. Anne-Nackawic Pulp & Paper Company* à Nackawic au Nouveau-Brunswick, la conduite d'entrée d'air avec ventilateur à tirage forcé des chaudières de récupération brûlant des solides de lessive noire est située au rez-de-chaussée de l'édifice à un endroit où l'air est relativement froid (10 - 18° C en hiver). Cet air comburant préchauffé à 120° C et plus à l'aide de serpentins de vapeur.

Mesure prise: on ajoute 50 pieds de conduite en fibre de verre afin de placer l'orifice d'entrée d'air à l'étage supérieur de l'édifice où la température se maintient dans les 38° C, réduisant ainsi la quantité de vapeur nécessaire pour le préchauffage de l'air comburant.

Économies d'énergie: 4 MMBtu/h

Économies d'argent: 4 MMBtu/h X 8 760 h/année X $2/MMBtu/h = $70 080/année

Coûts des améliorations: $88 500.

Recommandation: penser à placer les orifices d'entrée vers un endroit où la température ambiante est plus élevée afin de simplifier le préchauffage. Dans le cas précité, les coûts étaient particulièrement élevés à cause de la nécessité de renforcer les conduites et de les fixer solidement à l'édifice pour réduire les vibrations et en raison de complications techniques inhérentes à l'entrée d'air existante.

Préchauffage de l'air comburant avec du kaolin

La situation: une fabrique de poudre de kaolin destinée à servir de matériau de base pour la peinture se rend compte qu'elle pourrait récupérer d'importantes quantités de chaleur jusque là rejetées dans l'atmosphère. Un mélange d'air et d'argile chaude d'une température de 762° C et d'un débit de 41 000 lb/h dans la salle d'ensachage offre une source pratique d'énergie pour préchauffer l'air comburant d'un four à gaz.

Mesure prise: on installe un échangeur de chaleur dans lequel le mélange d'air et de kaolin est refroidi de 762° C à 204° C et la chaleur ainsi récupérée est utilisée pour préchauffer à 580° C à partir de la température ambiante d'environ 26° C, 7950 pi³/mn d'air comburant du four.

Économies d'énergie: 41 000 lb/h x 0,308 Btu/lb° F x (1450 — 400)° F = 13,3 MMBtu/h. Comme l'échangeur de chaleur fonctionne 6 000 heures par année à son coefficient de rendement nominal de 70 p. 100, les économies d'énergie annuelles = 0,70 x 13,3 MMBtu/h x 6 000 h/année = 55 800 MMBtu/année.

Économies d'argent: 55 800 MMBtu/année = 55 800 000 pi³ @ $2/1000 pi³ = $111 600/année.

Coûts des installations: $90 000.

Recommandation: ne pas sous-estimer toutes les sources possibles de chaleurs perdues pour préchauffer l'air comburant ou à d'autres fins.

Déchets: source de chaleur pour une usine

La situation: un fabricant de contre-plaqué, coupe-feu et matériaux isolants dans le Wisconsin constate, à l'ouverture d'une nouvelle usine qu'il est impossible de s'assurer un approvisionnement sûr en gaz naturel. Avec le recul que nous possédons actuellement, cette pénurie paraît providentielle car elle a forcé la société à considérer les 5 000 tonnes de déchets combustibles (qui auraient été autrement transportés à un incinérateur municipal) comme un combustible pour fournir de la chaleur à l'usine. On s'aperçoit que l'usine ne pourrait utiliser qu'environ 60 p. 100 de la chaleur produite par la combustion des déchets, le reste étant libéré dans l'atmosphère.

Mesure prise: la compagnie installe un incinérateur à pyrolyse (le mazout servant de combustible d'appoint pour les fins de semaines) qui, de pair avec un système de récupération de la chaleur perdue, peut récupérer 5 500 000 Btu/h. Dans le système, les rebuts de matières premières et autres déchets provenant des bureaux et d'ailleurs sont poussés par un bélier hydraulique dans une chambre primaire à partir d'un bac d'alimentation. Ils sont alors brûlés avec très peu d'oxygène, ce qui produit un gaz combustible. Lorsque ce gaz s'élève avec la fumée dans la base de la cheminée, il passe par un réacteur thermique où de l'air extérieur est aspiré. Le gaz et la fumée sont alors brûlés à des températures de l'ordre de 1040° C. De l'air chaud à 948° C est poussé par un ventilateur dans une chaudière où il chauffe l'eau qui, à son tour, réchauffe l'air chaud utilisé pour la climatisation de l'usine.

Économies d'énergie: 5,5 MMBtu/h = 34 320 MMBtu/année = 34 320 000 pi³/année.

Économies d'argent: 34 320 000 pi³/année @ $2/1000 pi³ = $68 640/année.
Économie supplémentaire d'environ $20 000/année en frais de transport des déchets.

Coûts des améliorations: environ $150 000.

Recommandation: tenter de réduire la quantité de déchets produits par l'usine, mais si la production de déchets est inévitable et si ces derniers sont disponibles en quantités suffisantes, les considérer comme une source de chaleur à diverses fins. Les incinérateurs à pyrolyse produisent généralement un faible volume de cendre sèches, stériles. Dans le cas de la société du Wisconsin, la direction étudie maintenant les moyens de se servir d'une partie de la chaleur non utilisée dans les séchoirs à peinture, afin de réduire encore davantage les factures énergétiques de l'entreprise.

Récupération de la chaleur perdue d'un four à recuire

La situation: les fours à recuire utilisés pour le traitement thermique des métaux à l'usine de la *Standard Tube of Canada* à Woodstock (Ont.) consomment de très grandes quantités d'oxygène et produisent des quantités excessives de gaz carbonique. Le gouvernement ontarien a demandé à la compagnie d'installer un système de ventilation. La *Standard Tube* a décidé de fournir la ventilation nécessaire tout en captant par la même occasion l'énergie latente dans les gaz d'échappement et les autres masses d'air chaud accumulées juste en-dessous du toit de l'usine.

Mesure prise: on décide d'installer un échangeur de chaleur à tambour afin de récupérer la chaleur perdue et de réchauffer l'air d'appoint de l'usine pendant l'hiver. Une grille en forme de H recueille 30 000 pi³/mn d'air à 49° C au niveau du plafond (2 500 pi³/mn d'air d'échappement plus 27 500 pi³/mn d'air ambiant chauffé par le rayonnement du four) et alimente à l'échangeur à tambour.

L'air extérieur est chauffé à environ 32° C, dépendamment de sa température initiale, avant d'être amené au niveau du plancher de l'usine. Une dérivation à fonctionnement manuel permet une ventilation et une arrivée d'air directe dès que la température de l'air extérieur dépasse un plancher établi.

Économies d'énergie: selon un cycle d'utilisation de 210 jours, les économies (par rapport au système classique d'échappement d'air chaud et au chauffage de l'air d'appoint par brûleurs au gaz à flamme directe) sont évaluées à 10 000 MMBtu/année à raison de trois postes de travail par jour.

Économies d'argent: les économies approchent $20 000 par année en se fondant sur un prix de $2/1000 pi³ pour le gaz.

Coûts des améliorations: le coût de l'échangeur de chaleur à tambour est de $8 000. Le capital nécessaire pour la réalisation complète du projet incluant la main-d'oeuvre et l'installation des conduites est de $60 000. L'expérience indique jusqu'à maintenant que l'investissement sera récupéré en environ trois ans.

Recommandation: envisager l'utilisation d'échangeurs de chaleur, y compris les échangeurs à tambour, pour récupérer la chaleur des gaz d'échappement. Dans le cas de la *Standard Tube*, un système de ventilation aurait de toute façon été nécessaire et la période de récupération de l'investissement correspondant au seul échangeur est d'environ un an. Des considérations économiques similaires peuvent fort bien s'appliquer à votre usine.

L'amélioration du calorifugeage des fours réduit la perte de chaleur

La situation: dans une usine américaine, les parois et les voutes suspendues des fours à cintrer à température interne maximum de 632° C sont faites de lourdes briques rouges réfractaires. Bien que les parois soient épaisses, il est évident pour la direction que la perte de chaleur est très élevée.

Mesure prise: la voute des fours est remplacée par une feuille métallique munie d'un calorifugeage de fibre céramique à faible densité. On ajoute également un calorifugeage aux parois.

Économies d'énergie: grâce à la réduction du temps de réchauffement de 2h30 par jour à 30 minutes par jour = 3 000 pi³/jour. Économies quotidiennes totales = 4400 pi³/jour.

Économies d'argent: 4400 pi³/j à $2/1000 pi³ = $8,80/jr x 210 jours/année = $1 848/année.

Coûts des améliorations: $1 750

Recommandation: étudier des projets similaires de calorifugeage des fours ou fourneaux. Dans le cas précité, il y a un certain nombre de bénéfices intangibles qui n'ont pas été pris en compte pour justifier l'investissement: la température ambiante près des fours a été abaissée de 10°C, l'allure de la production et la qualité du produit ont été améliorées et l'entretien a été réduit.

L'effluent de l'incinérateur réchauffe l'air du four

La situation: à l'usine de fabrication de conteneurs de Libby, McNeill & Libby, à Wallaceburg (Ont.) les normes provinciales en matière de pollution atmosphérique exigent l'installation d'incinérateur de vapeurs afin de limiter les émissions d'hydrocarbures, les odeurs et la pollution de l'air et d'éliminer le problème de particules de condensation qui contaminent la plaque d'étain se déplaçant dans le four de laminage de feuilles métalliques fonctionnant au gaz.

Mesure prise: La compagnie a installé un incinérateur y ajoutant un système de récupération de la chaleur afin d'utiliser l'échappement de l'incinérateur pour réchauffer l'air qui arrive au four.

Économie d'énergie: Un maximum de 1,1 MMBtu/h est fourni par l'effluent de l'incinérateur afin de préchauffer l'air du four.

Économie d'argent: 1,1 MMBtu/h x 4500 h/année = 4950 MMBtu/année = 4950 000 pi³/année @ $2/1000 pi³ = $9 900/année.

Coût des améliorations: Du coût total de près de $300 000, un peu plus de $150 000 sont imputables au système de récupération.

Recommandation: Surveiller de près les programmes de lutte contre la pollution afin d'étudier la possibilité d'y greffer des mesures de conservation d'énergie. Dans le cas de la Libby's l'utilisation d'un système de récupération de la chaleur a résulté en une consommation de gaz naturel totale pour le four et l'incinérateur d'à peine 10 p. 100 supérieure à la consommation antérieure du four seul.

L'isolation d'un autoclave réduit les pertes de chaleur

La situation: À l'usine de Wallaceburg de la Libby, McNeil and Libby, la direction se rend compte sur les Sterilmatics (les autoclaves automatiques à la vapeur et à marche continue utilisées pour stériliser les produits en conserve) constituent l'un des plus importants foyers de gaspillage d'énergie dans l'usine.

Mesure prise: On décide donc de calorifuger les trois Sterilmatics de l'usine à l'aide d'une jaquette en polyuréthane de trois pouces entourée d'un contenant d'acier inoxydable numéro 26.

Économies d'énergie et d'argent: Environ 6 350 000 pi^3 @ \$2/1000 pi^3 = \$12 700/année.

Coûts des améliorations: \$21 000.

Recommandation: Chercher à isoler l'équipement de combustion ou de traitement thermique pour réduire la consommation de combustible.

Des modifications des méthodes de cuisson réduisent la consommation d'énergie

La situation: Dans une compagnie américaine fabriquant des éléments d'ordinateur, les tores des mémoires d'ordinateurs sont cuits dans un four pendant 18 à 24 heures alors que quelques secondes à la température maximale (habituellement 1 000° C) suffiraient. Ce long cycle est rendu nécessaire par les caractéristiques du four et des plaques qui supportent les tores: en premier lieu, il est difficile d'être sûr que les tores atteignent la température nécessaire sans la dépasser; en second lieu, les plaques résistent mal aux brusques fluctuations de température et doivent être chauffées et refroidies lentement.

Mesure prise: Les tores sont étendus sur une courroie sans fin de fils de platine tissés qui les transporte dans un four tubulaire d'environ quatre pieds de long. Ils sont exposés à une forte température pendant 15 à 20 secondes. Leur passage continu permet d'échantillonner fréquemment des tores et de transmettre des informations sur tout ajustement de la température, de la teneur en oxygène de l'atmosphère du four et ainsi de suite. Comme résultat, la production de "bons" tores au point de contrôle final de la qualité a plus que doublé.

Économies d'énergie: Les changements ont réduit l'énergie nécessaire pour cuire les tores d'ordinateur de 120 Kwh le millier de tores à un peu moins de 0,9 Kwh le millier de tores.

Économies d'argent/coûts des améliorations: Non disponibles.

Recommandation: Réduire le plus possible le temps de chauffe des fours et abaisser au maximum les pertes de chaleur dues à la mise en température et au refroidissement des supports. Lorsque possible, un système de cuisson continue doit être mis en place.

Le coût d'une chaudière neuve est rapidement récupéré

La situation: Une compagnie américaine de produits alimentaires fait le bilan de son équipement afin d'améliorer la production et conclut qu'il serait avantageux d'installer des chaudières neuves. Deux vieilles chaudières à brûleur au mazout ont été déjà transformées pour fonctionner au gaz et au mazout et ont une puissance nominale de 600 HP chacune. Afin de suffire à la demande en période de pointe, on loue chaque année, en août et en septembre une chaudière de 200 HP. L'expansion de la compagnie laisse prévoir un accroissement prochain des besoins de vapeur. De plus, l'approvisionnement en gaz naturel est incertain et la transformation d'une vieille chaudière au gaz en chaudière à mazout est une besogne fastidieuse qui exige plusieurs hommes-heures. Enfin, les tests indiquent que le rendement des vieilles chaudières pour la transformation du combustible en vapeur est d'environ 70 p. 100.

Mesure prise: On décide d'installer une nouvelle chaudière de 800 HP (rendement de 85 p. 100) à brûleur mixte. Parallèlement, on installe un échangeur à calandre afin de préchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière avec les eaux résiduelles à 66° C des blanchisseurs, cuiseurs et réchauffeurs de la saumure.

Économies d'énergie et d'argent: L'installation de l'échangeur de chaleur a coûté \$3 000 et permis des économies de combustible d'environ \$6 000 par année grâce à la récupération de la chaleur perdue. Le rendement accru de la nouvelle chaudière par rapport à l'ancienne, a permis les économies suivantes:

Ancienne chaudière: 1 799 981 caisses avec 66 177 MMBtu
Nouvelle chaudière: 1 821 285 caisses avec 48 812 MMBtu

Gain: 21 304 caisses et 17 365 MMBtu

Il s'ensuit donc une économie additionnelle de $28 000 en combustible. Deux autres facteurs ont permis des économies supplémentaires de $20 000. D'abord, il n'est désormais plus nécessaire de louer une chaudière pour les périodes de pointe. Deuxièmement, on économise plus de 2 000 hommes-heures, puisque la nouvelle chaudière est automatique et que la transformation pour passer du gaz à l'huile ne prend que quelques minutes et non plus des heures.

Économies totales $48 000 par année + $6 000 par année = $54 000 par année.

Coûts des améliorations: $67 000.

Recommandation: Remplacer l'équipement de combustion désuet et inefficace dès que les perspectives d'économies d'énergie ou autres le justifient. Certains fabricants garantissent un haut rendement combustible/vapeur de leurs nouvelles chaudières.

Substances nocives brûlées pour produire de la vapeur

La situation: Une société de fabrication de produits chimiques fait face à un problème d'élimination de quantités substantielles de sous-produits chimiques liquides.

Mesure prise: La société installe une chaudière pour brûler le sous-produit qui a un pouvoir calorifique moyen de 6 000 Btu/lb et qui est complètement oxydé à 948° C. La chaudière est spécialement conçue pour supprimer les dépôts de suie et pour produire 64 000 livres par année de vapeur à 300 psig. Un total de 200 000 pi³/mn de gaz de carneau est produit et refroidi à 94° C avant de passer dans un épurateur placé dans la cheminée.

Économies d'énergie et d'argent: Le débit de gaz de carneau correspondant à 200 000 pi³/mn à 948°C est de 170 000 lb/hr. La chaleur spécifique des gaz de carneau est .567 Btu/lb°C et la température de saturation de la vapeur à 300 psig est de 218°C. La chaudière de récupération est conçue de manière à avoir une température de sortie des gaz de carneau de 260°C, par conséquent l'énergie fournie par les gaz de carneau représente: énergie disponible — 170 000 lb/h X .567 Btu/lb°C X (948 — 260) = 66,3 MMBtu/h.

Si l'eau d'alimentation est à 104° C, la chaleur nécessaire pour produire de la vapeur saturée à 300 psig est de 1027 Btu/lb. Si l'on alloue une perte de chaleur de 1 p. 100 la production de vapeur = 66,3 MMBtu/h x 1 lb/1027 Btu x 0,99 = 63 900 lb/h. La compagnie payait $1,25 les mille livres de vapeur produites à partir du mazout. Si l'on suppose un fonctionnement annuel de 3 000 heures:

Économies d'argent = 63 900 lb de vapeur/h x $1,25/1 000 lb de vapeur x 3 000 h/année =$240 000 par année.

On n'a pas tenu compte des économies dues à l'abaissement des coûts d'élimination.

Coût des améliorations: Chaudière = $400 000. Installation et accessoires = $300 000.

Recommandation: Considérer les sous-produits liquides et les solvants comme des sources de combustible pour la production de vapeur, le chauffage des locaux et ainsi de suite. L'escalade des prix du combustible rend cette option de plus en plus rentable.

L'installation d'analyseurs à oxygène améliore le contrôle de la combustion des chaudières

La situation: La brasserie Labatt du Canada utilise des chaudières discontinues. Il est physiquement impossible de réagir manuellement aux fluctuations de la charge.

Mesure prise: Labatts décide d'installer des analyseurs à oxygène et d'automatiser entièrement le contrôle de la combustion des chaudières de sa brasserie de Montréal. Le contrôle automatique permet de réagir rapidement aux fluctuations de la charge.

Économies d'énergie et d'argent: Les économies anticipées sont de 1,25 p. 100 de la consommation de combustible ou 5 000 000 pi³ de gaz naturel par année.

Coûts des améliorations: Le système a coûté $60 000 installation comprise. Le projet était devenu rentable en raison d'une hausse anticipée de 15 p. 100 des coûts annuels de combustible les trois années subséquentes et de 10 p. 100 par la suite. Le taux de rendement du capital investi selon la méthode des flux actualisés était donc de 20 p. 100, permettant ainsi de récupérer l'investissement en 4 ans.

Recommandation: Faire des projections de la montée future des prix afin de déterminer la rentabilité des projets de conservation de l'énergie.

L'échauffement de l'air comburant économise le gaz à une usine de traitement du verre

La situation: Dans le cadre d'un programme d'entretien ordinaire, une verrerie décide d'économiser de l'énergie en utilisant un récupérateur de cheminée pour préchauffer l'air comburant. Un réservoir de surface est restauré et muni de deux brûleurs à flamme plate, d'un

ventilateur de 16 onces et d'un mélangeur air-gaz à régulation zéro. Le réservoir est ovale, environ 6 pieds sur 8 pieds et possède une paroi métallique d'environ 12 pouces de hauteur. Il peut contenir 3,5 tonnes de verre.

Mesure prise: Alors que l'équipement et la conception du réservoir demeure inchangés, on modifie la cheminée pour que le tirage qui était auparavant inversé se fasse vers le haut. Le récupérateur est installé sur une base de matériau réfractaire d'environ 48 pouces de hauteur et la nouvelle cheminée est bâtie sur la cheminée existante au niveau du plancher; elle a été dotée d'une porte de nettoyage et/ou d'arrivée d'air froid. L'unité, conçue pour des chaleurs de 2 100 à 1 189° C, est faite de 1/8 de pouce d'Incoloy 800 pour le récupérateur et de 1/16 de pouce d'acier inoxydable pour la cheminée. Le tuyau central a environ 7 pieds de long sur 24 pouces de diamètre, avec des bandes verticales de 3 pouces de long sur 3/8 de pouce de large soudées à l'intérieur. Un tuyau concentrique plus large et de la même longueur est placé par-dessus le tuyau central, en laissant un espace d'air de 3/8 de pouce entre les deux tuyaux. Le tuyau extérieur est calorifugé puis recouvert d'une feuille de métal. Deux tuyaux d'arrivée et de sortie de 6 pouces de diamètre sont fixés au tuyau extérieur.

Économies d'énergie: Les économies annuelles (50 semaines) de gaz pour fondre et entreposer le verre sont de 4 212 500 pi³/année (16 587 500 pi³/année avant l'installation du récupérateur et 12 375 000 pi³/année après l'installation).

Économies d'argent: À un coût de $2/1000 pi³, les économies de combustible se chiffrent à (4212,5) ($2) = $8 425/année.

Coûts des améliorations: en 1971, les coûts d'installation étaient de $4 520 — en les doublant ($9 040) pour 1977 il suffit de $\frac{\$9\,040}{\$8\,425}$ = 1,07 année pour récupérer le montant investi.

Recommandation: Le récupérateur de cheminée est un moyen intéressant pour préchauffer l'air comburant ou tout autre air.

Des récupérateurs chauffent l'air d'appoint au moyen de l'échappement de fours

La situation: Dans une usine canadienne de produits finis abrasifs, un bilan énergétique révèle que d'importantes quantités de chaleur sont perdues dans les fumées qui s'échappent par les cheminées des fours.

Mesure prise: En quatre mois, des échangeurs thermiques verticaux de surface, sont installés sur la cheminée de chacun des six fours de l'usine. Au cours du cycle de 10 jours nécessaire pour éviter des chocs de température à la meule soumise à la cuisson, la température des gaz de carneau varie de 94° C et 948° C. L'air froid est réchauffé de -12° C à 18° C dépendamment de la chaleur des gaz de carneau et ensuite "mis en état" par un réchauffeur au gaz à flamme directe de débit moyen de 25:1. L'air passe ensuite dans le système de ventilation de l'usine.

Économies d'énergie: 4 680 MMBtu/année = 4 680 000 pi³/année.

Économies d'argent: 4 680 000 pi³/année @ $2/1000 pi³ = $9 360/année.

Coûts des améliorations: $17 000.

Recommandation: Considérer les gaz de carneau comme un foyer de chaleur perdue qui pourrait être récupérée. Accorder toute l'attention nécessaire à la formation de l'opérateur du nouveau système. L'expérience démontre qu'avec une formation adéquate, les problèmes de mise en marche peuvent être considérablement réduits.

Réduction de l'excès d'air dans un four de fonderie d'acier

La situation: Les fours de traitement thermique au mazout de la *Dominion Foundries and Steel* ont souvent besoin d'excès d'air pour assurer une température uniforme. Cependant, la quantité d'excès d'air dans un four donné est parfois plus élevée que celle qui serait nécessaire.

Mesure prise: Dans l'un des fours de la fonderie, le débit d'air doit être maintenu constant pendant tout le cycle. La *Dominion Foundries et Steel* essaie de réduire peu à peu ce débit constant d'air pendant des cycles successifs tout en contrôlant soigneusement la répartition de la température du four et la qualité du produit. La compagnie constate ainsi qu'elle peut réduire le débit d'air d'environ 40 p. 100 pour un four de 10 sur 21½ pieds particulier sans que cela influe de façon notable sur l'uniformité de la température.

Économies d'énergie: Cette mesure a permis d'épargner 12 MMBtu/cycle x 416 cycles/année = 4 992 MMBtu/année.

Économies d'argent: 4 992 MMBtu/année de gaz de four à coke à $2/MMBtu = $9 984/année. Les coûts du contrôle du débit d'air ne sont pas disponibles.

Recommandation: Lors des tests, chaque four doit être considéré individuellement et il faut s'assurer que les coupures d'air ne sont pas excessives afin d'éviter d'endommager le produit à cause d'un manque d'uniformité de température. Si l'on dispose du temps et de l'argent nécessaires pour effectuer correctement les tests, cette mesure peut permettre d'économiser beaucoup d'énergie.

Rebuts de plastiques brûlés dans une chaudière

La situation: Dans une usine de la General Motors, 24 000 lbs par année de déchets de plastique sont réduits en granules et envoyés à un site de remplissage. Une grosse chaudière fonctionne au charbon, en dépit du haut contenu en Btu des résidus de plastiques.

Mesure prise: Un simple système d'aspiration est installé sur la chaudière afin de permettre le mélange du charbon et de l'acrylique granuleux, de l'ABS, du polypropylène et du polycarbonate.

Économies d'argent: 360 MMBtu/année = 13,8 tonnes de charbon à $40 la tonne = $552/année.

Coûts des améliorations: $750.00.

Recommandation: Envisager sérieusement l'utilisation de plastique ou d'autres rebuts comme combustible (voir d'autres études de cas). Aux économies énergétiques de base offertes dans bien des cas, il faut ajouter l'élimination des frais considérables attachés à la destruction des rebuts. Les plastiques ont un contenu thermique élevé et laissent généralement très peu de cendres; cependant, la combustion de certains matériaux comme le chlorure de polyvinyle libère des gaz nocifs et d'autres résidus et il faut bien se renseigner avant de tenter de les utiliser comme source d'énergie.

La modernisation de fours de forge à ouvreau en améliore le rendement

La situation: L'usine de la John Deere Limited à Welland utilise un certain nombre de fours de forge à ouvreau. Dans le cadre d'un bilan énergétique global, la compagnie se rend compte qu'il est possible d'améliorer le rendement énergétique de ses fours. En fait, les évaluations préliminaires indiquent qu'un four redessiné pourrait permettre de réduire d'environ 19 p. 100 la consommation de combustible. Les économies réelles en cours d'utilisation ont plus que doublé ce chiffre.

Mesure prise: Après des essais sur prototype, de nouveaux fours sont installés. Leurs caractéristiques sont les suivantes:

—Garnissage en céramique coulé et non plus en briques réfractaires.
—Préchauffage de l'air comburant à 400° en mêlant l'air ambiant et l'échappement de la chaudière.
—Remplacement des écrans refroidis à l'eau par de la fibre de céramique Fibrefrax.
—Voute redessinée permettant une meilleure réflection de chaleur de façon à réduire le temps de réchauffement des matériaux de 40 p. 100.
—Usage de souffleurs individuels de 3 HP plutôt que d'un système central de 40 HP.

Aucune approbation externe n'était nécessaire et les vieux fours ont été remplacés sans interruption de la production au rythme d'environ un par mois.

Économies d'énergie: 45 pour cent global = 580 MMBtu/année.

Économies d'argent: 580 MMBtu/année = 3 135 gallons à 35 cents = $1 097 par année.

Coûts des améliorations: $5 300 par four; le taux de rendement du capital investi selon la méthode des flux actualisés est de 41 p. 100 et la période de récupération de l'investissement est de 3 ans.

Recommandation: Envisager la possibilité de modifier ou de remplacer l'équipement de l'usine ou la fonderie. Ne pas se laisser rebuter par une période de récupération de l'investissement de 3 ans, par exemple, comme dans le cas de la John Deere où une analyse du taux de rendement de l'investissement selon la méthode des flux actualisés de même que d'autres facteurs (coûts d'entretien annuels réduits de $870 par four) a été suffisante pour convaincre la direction d'investir de l'argent pour économiser de l'énergie et par le fait même, de l'argent.

Chaudière chauffée à l'huile usagée

La situation: À l'usine de la International Harvester de Chatham (Ont.), 5 000 gallons de lubrifiant usagé (comme de l'huile à moteur) sont jetés chaque année. La compagnie se rend compte que l'huile usagée peut servir de combustible si elle est récupérée et emmagasinée.

Mesure prise: La compagnie institue un programme dans le cadre duquel les huiles usagées provenant de divers secteurs de l'usine, (départements des chariots élévateurs à fourche et d'entretien des véhicules, etc.) sont recueillies et déposées dans un réservoir central. Trois fois par année, l'huile est transportée au réservoir central de la chaudière principale et est mélangée à du mazout lourd C n° 6.

Le réservoir principal a une capacité de 50 000 gallons et est maintenu à environ 66° C. La température relativement élevée du mazout alliée au fait que le lubrifiant est introduit par le bas du réservoir, en lots d'environ 1 750 gallons, assure un bon mélange. Il ne se produit pas de stratification apparente.

Économies d'énergie et d'argent: 5 000 gallons/année d'huile récupérée fournissent environ 960 MMBtu/année à $2/ MMBtu = $1920/année.

Coûts des améliorations: Les frais de main-d'oeuvre pour le transport et le pompage de l'huile = $80 par année.

Recommandation: Considérer une grande variété de déchets comme source potentielle de combustible pour les chaudières, fours et fourneaux.

Quelques trucs utiles pour économiser grâce au contrôle de la combustion

Fours et fourneaux.

1. Calculer et prendre note du rendement de la chaudière chaque jour.
2. Établir un calendrier d'entretien des brûleurs.
3. Régler régulièrement les brûleurs pour obtenir le meilleur fonctionnement possible.
4. Chauffer l'huile à la température appropriée pour une bonne pulvérisation.
5. Éliminer les gaz combustibles des gaz de carneau.
6. Réduire le débit d'air comburant à son niveau optimum.
7. Remplacer les brûleurs désuets par d'autres plus efficaces.
8. Utiliser les rebuts et les sous-produits comme combustible chaque fois que possible.
9. Limiter et contrôler l'air comburant secondaire dans l'exploitation des fours.
10. Établir un bilan calorifique pour tout l'équipement de combustion afin de mieux comprendre l'utilisation de l'énergie et les foyers de déperdition.
11. Utiliser les gaz brûlés chauds comme source d'énergie.
12. Isoler les fours et fourneaux afin de réduire les pertes de chaleur.
13. Prévenir l'infiltration d'air froid dans les fours.
14. Arrêter autant que possible la combustion lorsque le four est inutilisé.
15. Étudier l'usage possible des contrôleurs à came ou d'autre système pour contrôler le cycle d'arrêt de l'équipement de combustion.
16. Planifier les opérations de l'usine pour un fonctionnement à pleine charge de l'équipement de combustion.
17. Réduire les pertes d'énergie pendant l'enfournement et le défournement (intermittent).
18. Éliminer l'exagération dans les spécifications de l'équipement et des pratiques.
19. Analyser régulièrement les gaz de carneau.
20. Surveiller les fuites aux joints d'étanchéité causées par l'ouverture et la fermeture fréquentes du four.
21. Envisager l'utilisation de registres de cheminée à contrôle automatique.

Chaudières industrielles.

1. Considérer la température des gaz brûlés comme un indicateur du rendement de la chaudière.
2. Faire de fréquentes vérifications du rendement de la chaudière.
3. Si plusieurs chaudières sont utilisées en série, établir un ordre d'utilisation par ordre de rendement décroissant.
4. Garder le plus possible de chaudières en fonctionnement à pleine charge (plutôt que d'avoir un plus grand nombre de chaudières fonctionnant à charge partielle).
5. Tenir toutes les surfaces de transfert de chaleur propres.
6. Améliorer les systèmes de contrôle des chaudières.
7. Réduire l'excès d'air pour augmenter le rendement de la chaudière.
8. Utiliser des chaudières de récupération et des économiseurs pour utiliser les gaz brûlés chauds.
9. Utiliser l'eau de purge des chaudières comme vapeur de la détente ou placer un échangeur de chaleur sur le canal de purge pour réchauffer l'eau d'appoint.
10. Réduire la purge en traitant l'eau d'alimentation.

USAGE DANS LE SI

Quelques unités SI dérivées

Grandeur	Nom de l'unité	Symbole	Equivaut à
force	newton	N	$kg \cdot m/s^2$
pression	pascal	Pa	N/m^2
travail, énergie, quantité de chaleur	joule	J	N·m
puissance, flux énergétique thermique	watt	W	J/s
quantité d'électricité	coulomb	C	A·s
potentiel électrique	volt	V	W/A
résistance électrique	ohm	Ω	V/A
capacité électrique	farad	F	C/V
flux d'induction magnétique	weber	Wb	V·s
induction magnétique	tesla	T	Wb/m^2
inductance	henry	H	Wb/A
fréquence	hertz	Hz	s^{-1}
flux lumineux	lumen	lm	cd·sr
éclairement	lux	lx	lm/m^2

Exemples d'unités SI dérivées exprimées en termes d'autres unités

Grandeur	Description	Expression en d'autres unités SI
superficie	mètre carré	m^2
volume	mètre cube	m^3
vitesse — linéaire — angulaire	mètre par seconde radian par seconde	m/s rad/s
accélération — linéaire — angulaire	mètre par seconde carrée radian par seconde carrée	m/s^2 rad/s^2
masse volumique	kilogramme par mètre cube	kg/m^3
viscosité dynamique	pascal-seconde	Pa.s
moment d'une force	newton-mètre	N.m
densité de flux thermique, éclairement énergétique	watt par mètre carré	W/m^2
capacité thermique, entropie	joule par kelvin	J/K
chaleur massique, entropie massique	joule par kilogramme kelvin	J/(kg K)
énergie massique	joule par kilogramme	J/kg
conductivité thermique	watt par mètre-kelvin	W/(m.K)
énergie volumique	joule par mètre cube	J/m^3
perméabilité	henry par mètre	H/m
résistance thermique (R)	mètre-kelvin carré par watt	$m^2.K/W$.

Unités SI en équivalence communément employées et leurs facteurs de conversion

1 pouce = 25 mm	1 verge cube = 0.76 m^3
1 pied = 0.30 m	1 pinte (Iq) = 1.1 L
1 verge = 0.91 m	1 gallon = 4.5 L
1 mille = 1.6 km	1 once = 28 g
1 pouce carré = 6.4 cm^2	1 livre = .45 kg
1 verge carré = 0.84 m^2	1 horsepower (R-U) = 745 W
1 acre = 0.40 ha	1 livre-force = 4.4 N
1 pouce cube = 16 cm^3	1 livre-force par pouce carré = 6.8 kPa
1 pied cube = 28 dm^3	

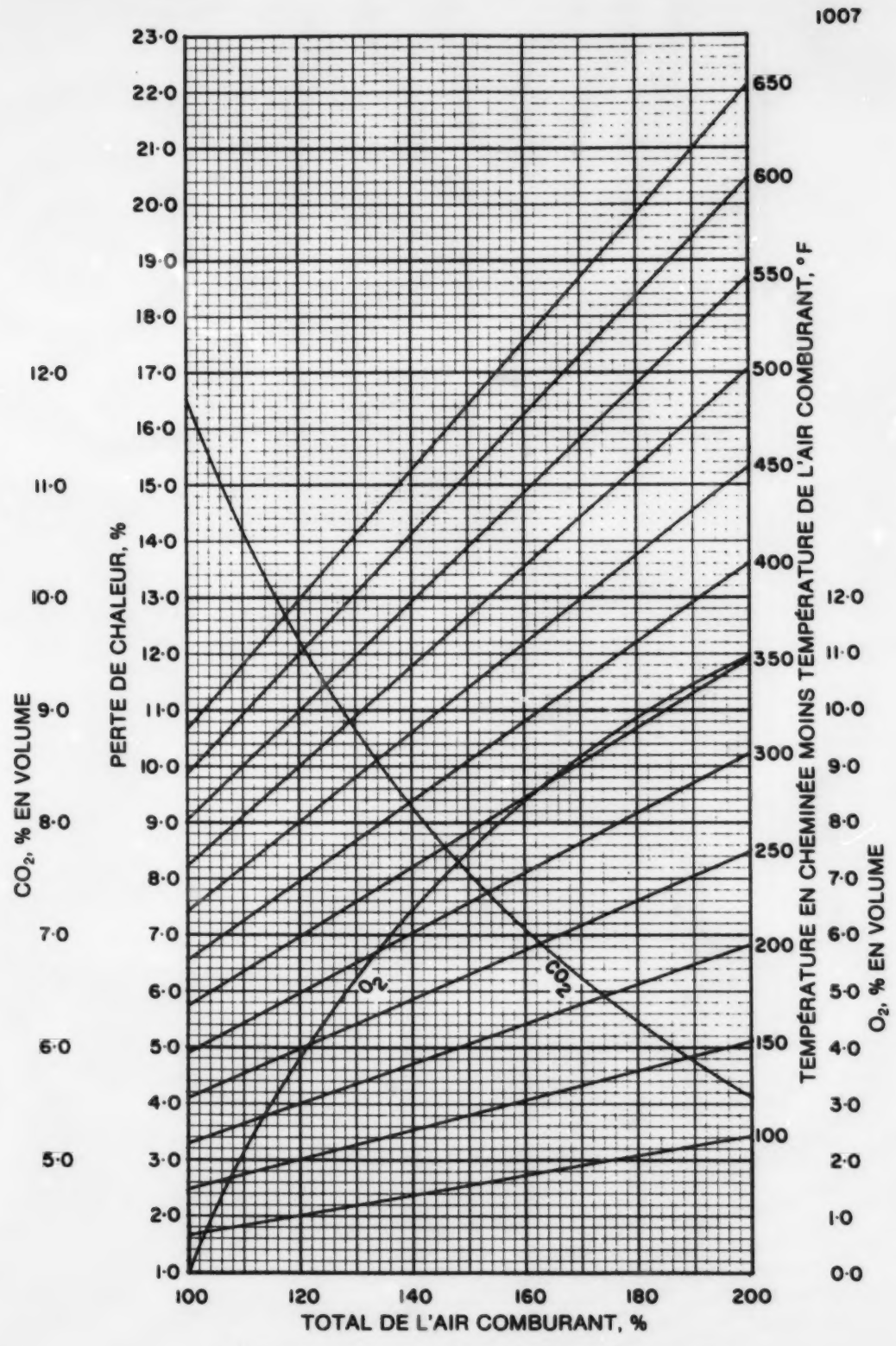
Prefixes SI

Facteur de multiplication	Préfixe	Symbole
1.000 000 000 000 000 000 = 10^{18}	exa	E
1 000 000 000 000 000 = 10^{15}	péta	P
1 000 000 000 000 = 10^{12}	téra	T
1 000 000 000 = 10^{9}	giga	G
1 000 000 = 10^{6}	méga	M
1 000 = 10^{3}	kilo	k
100 = 10^{2}	hecto	h
10 = 10^{1}	déca	da
0.1 = 10^{-1}	déci	d
0.01 = 10^{-2}	centi	c
0.001 = 10^{-3}	milli	m
0.000 001 = 10^{-6}	micro	μ
0.000 000 001 = 10^{-9}	nano	n
0.000 000 000 001 = 10^{-12}	pico	p
0.000 000 000 000 001 = 10^{-15}	femto	f
0.000 000 000 000 000 001 = 10^{-18}	atto	a

Unités pouvant être utilisées avec les unités SI

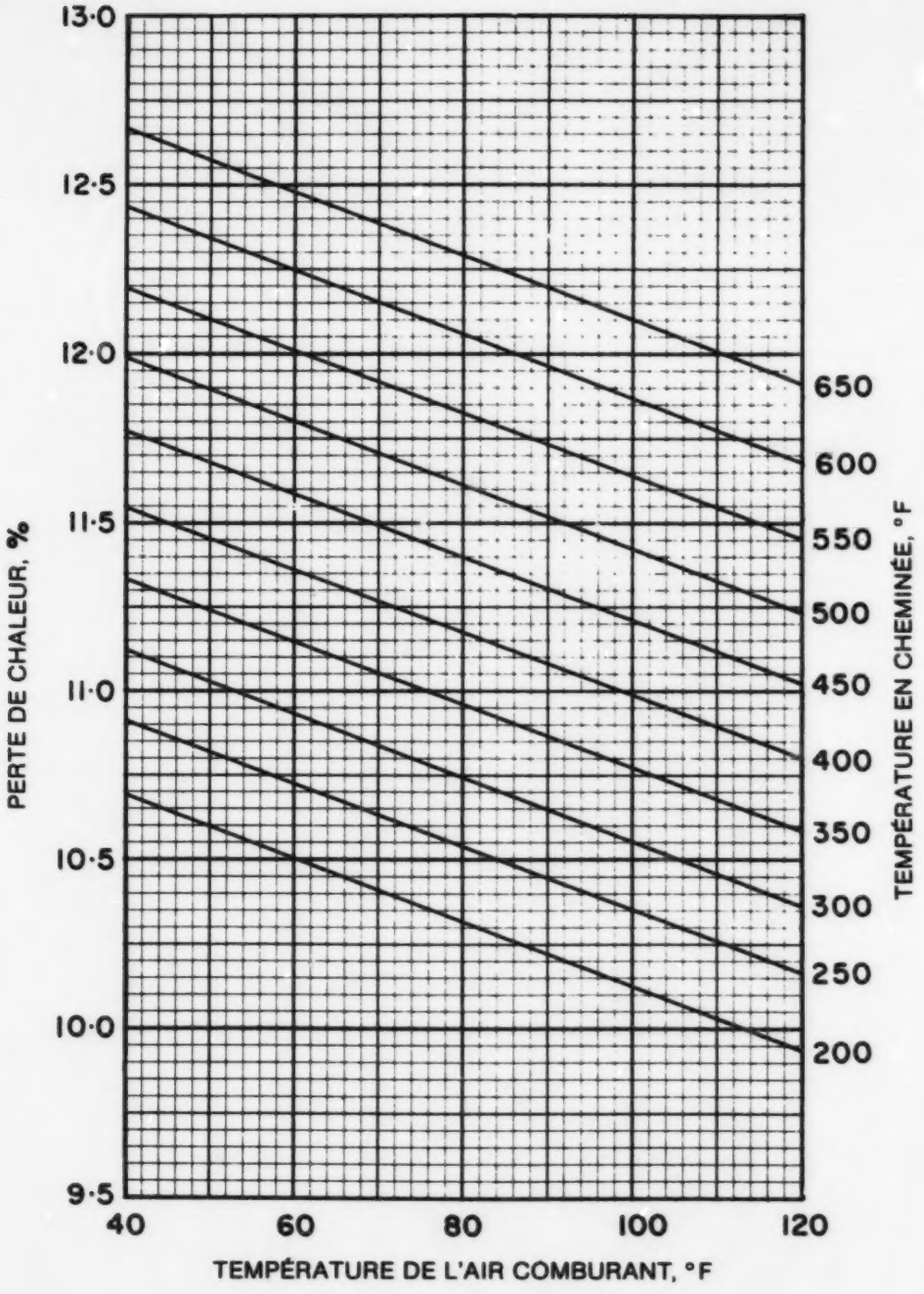
Grandeur	Nom	Symbole	Définition
temps	minute heure jour	min h d	1 min = 60 s 1 h = 3600 s 1 d = 86 400 s
angle plan	degré minute seconde	° ' "	1° = (π/180) rad 1' = (π/10 800) rad 1" = (π/648 000) rad
superficie	hectare	ha	1 ha = 1 hm^2 = 10 000 m^2
volume	litre	L	1 L = 1 dm^3
température	degré Celsius	°C	pour les intervalles de température 1°C = 1 K
masse	tonne	t	1 t = 1000 kg = 1 Mg

Appendice

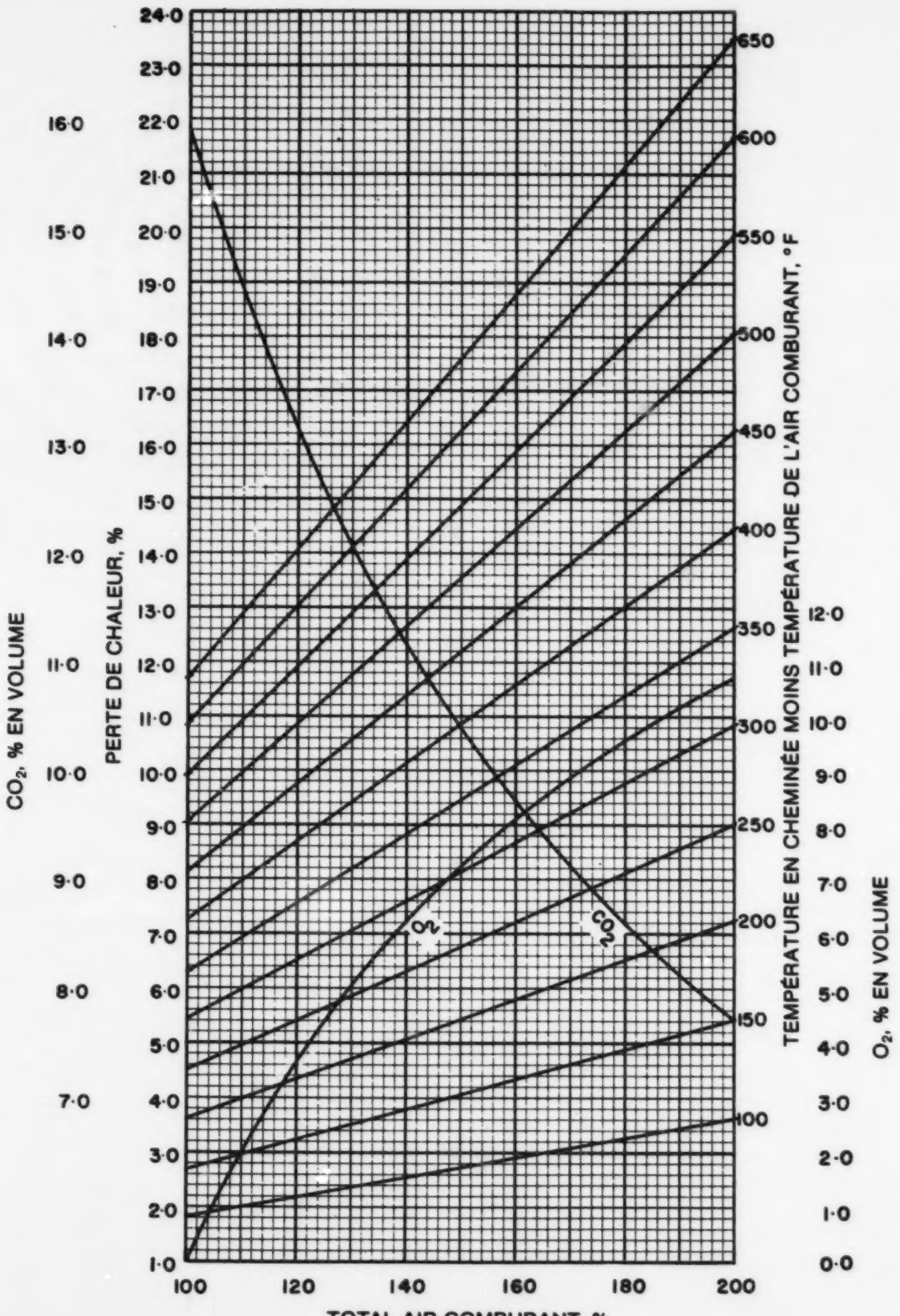


PERTES EN GAZ DE CARNEAU SECS POUR UNE GAMME DE DIFFÉRENTIELS DE TEMPÉRATURE COMBUSTIBLE: GAZ NATUREL; 1007 Btu/pi³

1007



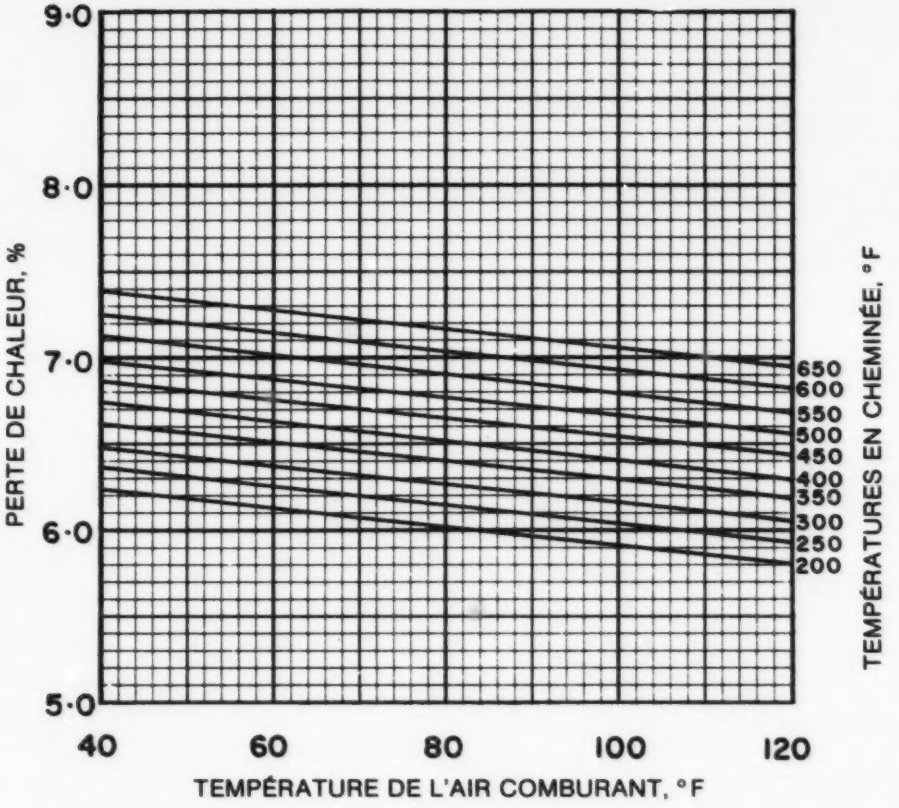
PERTE D'HYDROGÈNE POUR UNE GAMME DE TEMPÉRATURES EN CHEMINÉE.
COMBUSTIBLE: GAZ NATUREL, 1007 Btu/pi³



PERTES DE GAZ DE CARNEAU SEC POUR UNE GAMME DE DIFFÉRENTIELS DE TEMPÉRATURE

(MAZOUT N° 6)

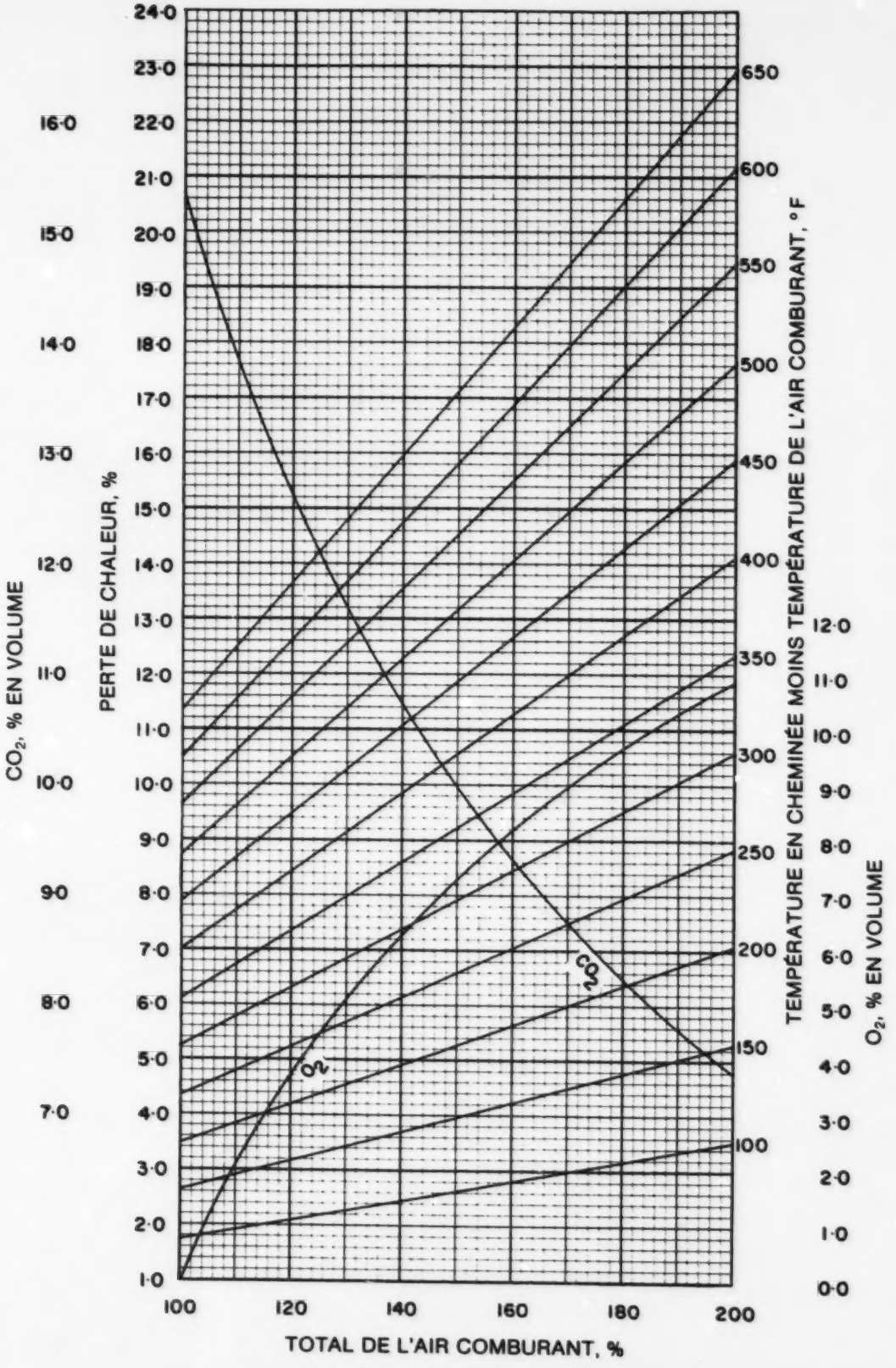
9720



PERTE D'HYDROGÈNE POUR UNE GAMME DE TEMPÉRATURES EN CHEMINÉE

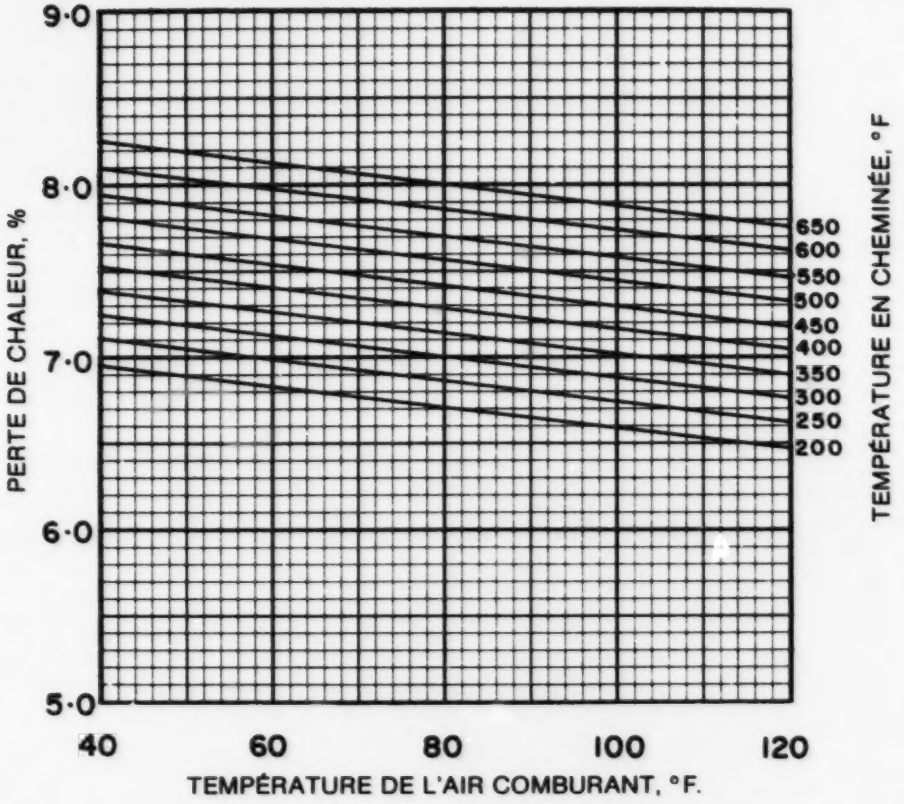
(MAZOUT N° 6)

9720



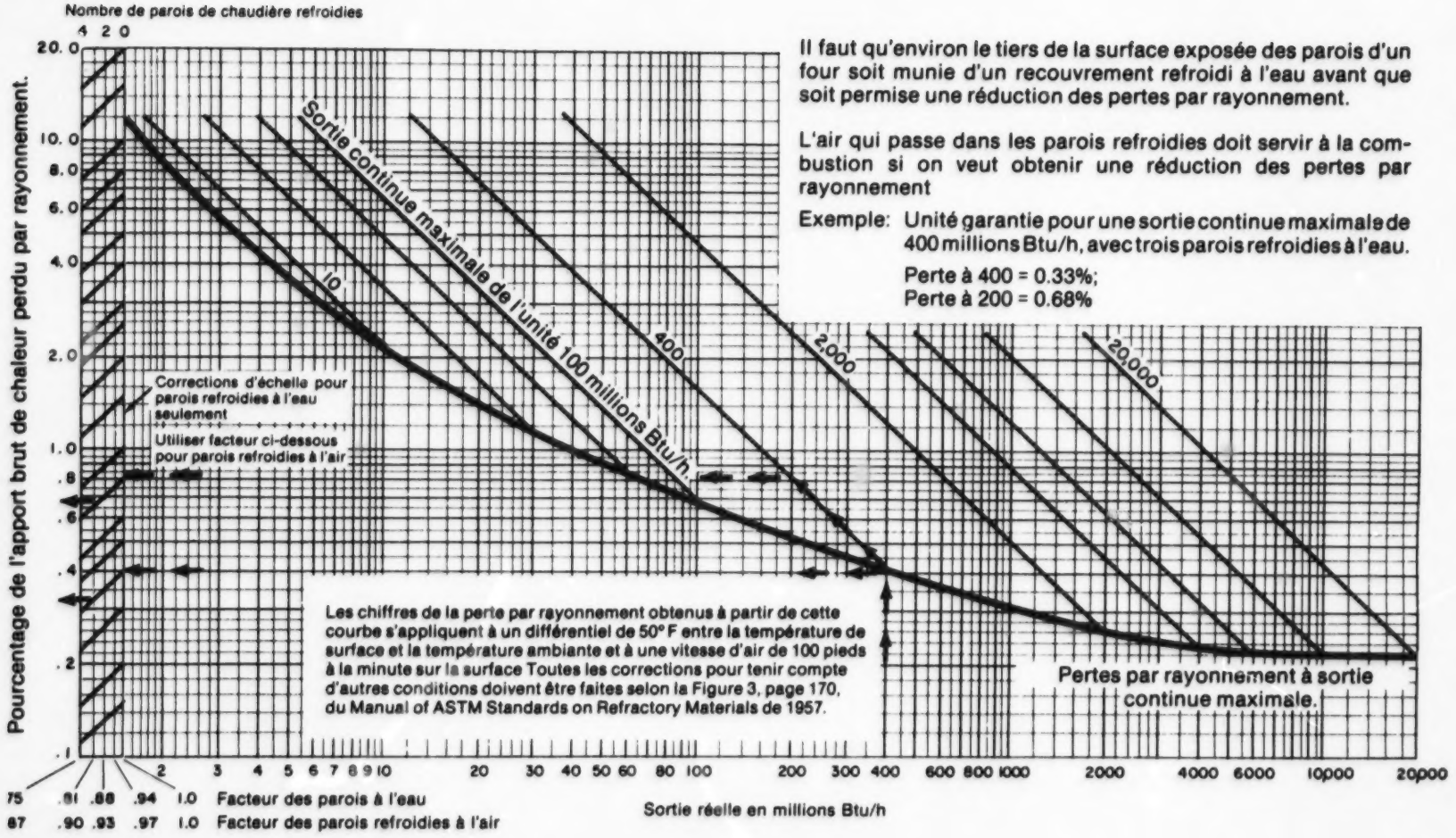
PERTES DE GAZ DE CARNEAU SEC POUR UNE GAMME DE DIFFÉRENTIELS DE TEMPÉRATURE
(MAZOUT Nº 2)

8507



PERTE D'HYDROGÈNE POUR UNE GAMME DE TEMPÉRATURES EN CHEMINÉE. (MAZOUT N° 2)

8507



Il faut qu'environ le tiers de la surface exposée des parois d'un four soit munie d'un recouvrement refroidi à l'eau avant que soit permise une réduction des pertes par rayonnement.

L'air qui passe dans les parois refroidies doit servir à la combustion si on veut obtenir une réduction des pertes par rayonnement

Exemple: Unité garantie pour une sortie continue maximale de 400 millions Btu/h, avec trois parois refroidies à l'eau.

Perte à 400 = 0.33%;
Perte à 200 = 0.68%

DIAGRAMME DES PERTES DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT ET CONVECTION EN PRENANT POUR HYPOTHÈSE UN POUVOIR D'ÉMISSION DE 0.95
PUBLIÉ GRÂCE À LA COURTOISIE DE L'AMERICAN BOILER MANUFACTURERS ASSOCIATION.